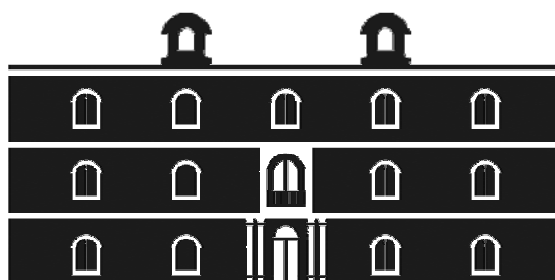




Universidad
Politécnica
de Cartagena



industriales
etsii UPCT

Proyecto Fin de Carrera

Modelización numérica de la capa límite térmica y viscosa del flujo de aire y de la dispersión de gotas de agua procedentes de la torre de refrigeración en un entorno urbano.

Titulación: Ingeniería Industrial

Alumno: Francisco Sánchez Fernández

Directores: Antonio Sánchez Kaiser
Blas Zamora Parra

Cartagena, Octubre de 2013

Agradecimientos

Son muchas las personas que me han apoyado y ayudado para llegar hasta aquí, tanto en la elaboración de este Proyecto Fin de Carrera, como en esta travesía de 5 años por la Universidad Politécnica de Cartagena. Estas palabras son sólo una muestra de la gratitud que siento hacia ellas.

A mis directores de este proyecto Antonio y Blas, por todo lo que me han enseñado, y sobre todo por la atención y la ayuda que siempre me han prestado ante cualquier cosa que yo necesitara.

A Antonio Consuegro, persona que tiene toda mi admiración, no sólo por todas las horas que he compartido con él, ni por todo lo que me ha enseñado de CFD, sino por su actitud, siempre dispuesto a ayudarme con una sonrisa ante cualquier problema que surgiera.

A mis compañeros y amigos Fran, Lucas, Javi y Miguel, porque junto a ellos el camino ha sido mucho más fácil y ameno.

A todos los profesores y profesoras que con sus lecciones me han formado como profesional.

A mi familia, especialmente a mis padres por apoyarme en mi camino y velar porque nunca me faltara de nada. Porque sin ellos no hubiera conseguido alcanzar mis metas ni sería el que ahora soy.

A Loli, porque siempre está a mi lado, en los buenos y en los malos momentos, por la seguridad que tengo al saber que pase lo que pase ella estará ahí.

Índice general

Capítulo 1. Introducción	1
1.1. Contexto del Proyecto	1
1.2. Origen del estudio	3
1.3. Estado del arte	4
1.4. Objetivos	5
1.5. Planteamiento del proyecto	6
Capítulo 2. Modelos físicos	7
2.1. Introducción	7
2.2. Configuración física	7
2.3. Modelo matemático flujo atmosférico	9
2.4. Modelo matemático fase discreta	14
2.4.1. Ecuaciones del movimiento para las gotas	15
2.4.2. Dispersión turbulenta de partículas	16
2.4.3. Leyes de intercambio de masa y calor	18
2.4.4. Acoplamiento entre la fase continua y discreta	21
Capítulo 3. Modelo numérico	24
3.1. Introducción	24
3.2. Descripción general del código <i>Fluent</i>	25
3.3. Resolución de modelos	26
3.3.1. Discretización del dominio	27
3.3.2. Integración de las ecuaciones de conservación para cada volumen finito	28
3.3.3. Linealización de las ecuaciones discretizadas y resolución	31
3.4. Condiciones de contorno	35
3.4.1. Condiciones de contorno en la fase continua	36

3.4.2. Condiciones de contorno en fase discreta	47
3.5. Estudio del mallado	50
3.5.1. Comparación base.....	51
3.5.2. Comparación aligeramiento parte superior.....	55
3.5.3. Comparación refinado del entorno del edificio principal.	59
3.5.4. Conclusiones del estudio de mallado.....	66
Capítulo 4. Validación experimental del modelo numérico.....	67
4.1. Introducción	67
4.2. Adquisición de datos experimentales	67
4.3. Variables a analizar.....	69
4.3.1. Capa límite viscosa y térmica	70
4.3.2. Deposición	71
4.3.3. VMD.....	72
4.4. Validación experimental.....	77
4.4.1. Introducción a la validación experimental.	77
4.4.2. Capa límite viscosa.	82
4.4.3. Capa límite térmica	86
4.4.4. Fase discreta: deposición y VMD.	89
• Caso 1: 18/06/2012.....	90
• Caso 2: 31/07/2012.....	93
• Caso 3: 02/10/2012.....	97
• Caso 4: 22/10/2012.....	100
• Caso 5: 11/01/2013.....	103
• Caso 6: 14/02/2013.....	106
• Caso 7: 26/02/2013.....	108
• Caso 8: 22/03/2013.....	110
• Caso 9: 07/06/2013.....	113

• Caso 10: 13/06/2013	116
4.5. Conclusiones de la validación experimental	119
Capítulo 5. Resultados	122
5.1. Introducción	122
5.2. Resultados	122
5.2.1. Influencia de la velocidad del viento en la deposición.....	123
5.2.2. Influencia de las condiciones de temperatura y humedad en la deposición.....	124
5.3. Futuras líneas de trabajo	129
Anexo I. Código <i>Matlab</i> empleado para calcular VMD	130
Bibliografía.....	134

Índice de figuras

Fig.1. Torre de refrigeración piloto en Campus UMH de Elche.	2
Fig.2. Edificios del dominio a modelar.....	8
Fig. 3. Modelo geométrico en 3D de los edificios del dominio.	8
Fig. 4. Geometría exterior e interior.	9
Fig. 5. Detalle de los elementos hexaédricos utilizados en la malla.	27
Fig. 6. Esquema de la nomenclatura para un volumen de control en una malla cartesiana bidimensional.	28
Fig. 7. Medidas de dirección y velocidad del viento a partir de la estación meteorológica para el caso 02/10/12.....	37
Fig. 8. Mapas de frecuencia relativa de la dirección y de la velocidad del viento para el caso 02/10/12.	38
Fig. 9. Torre de medición meteorológica instalada en el Campus UMH de Elche.	40
Fig. 10. Perfil vertical de velocidad del día 11/01/13, obtenido a partir de 2 y 3 puntos.	41
Fig. 11. Medidas de temperatura y humedad relativa del aire, para el caso 02/10/12.....	44
Fig. 12. Medidas de temperatura a partir de la torre de medición meteorológica para el caso 22/10/12.	45
Fig. 13. Capa límite térmica para el caso 02/10/12	46
Fig. 14. Distribución de los papeles hidrosensibles para realizar el ensayo de arrastre.	47
Fig. 15. Manchas que dejan las gotas en los papeles hidrosensibles tras ensayo de arrastre. .	48
Fig. 16. Forma típica de una distribución Rosin-Rammler.	49
Fig. 17. Comparación del interfaz de los distintos software de mallado.....	50
Fig. 18. Imágenes de la malla original y malla B.	51
Fig. 19. Imágenes de la malla A y de la malla B.	52
Fig. 20. Detalle de la situación de los perfiles a analizar en el dominio.	52
Fig. 21. Detalle de la diferencia entre la altura de los elementos de malla B y malla C.....	56

Fig. 22. Detalle del tamaño de los elementos alrededor de la torre de refrigeración.....	59
Fig. 23. Comparación del penacho de humedad para el caso 31/07/12.....	60
Fig. 24. Situación de los papeles hidrosensibles en las distintas líneas de deposición para el caso 02/10/12.....	68
Fig. 25. Situación de los perfiles de velocidad y temperatura usados en la validación experimental.	71
Fig. 26. Imagen de la deposición obtenida tras la simulación del caso 22/10/12.	72
Fig. 27. Detalle de la distribución de tamaños de las gotas al salir de la torre de refrigeración.	73
Fig. 28. Mapa de frecuencia relativa de la dirección del viento dividido en rangos para la simulación segmentada	121
Fig. 29. Comparación de las trayectorias en caso de capa límite térmica estable e inestable	128

Índice de gráficos

Gráfico 1. Perfiles de velocidad en la salida del dominio del caso 02/10/12.	42
Gráfico 2. Perfiles de velocidad en “exterior” en “comparación base”.	53
Gráfico 3. Perfiles de velocidad en “Torre meteorológica” en “comparación base”	53
Gráfico 4. Perfiles de velocidad en “salida” en “comparación base”.	53
Gráfico 5. Perfiles de temperaturas en “exterior” en “comparación base”.	54
Gráfico 6. Perfiles de temperatura en “Torre meteorológica” en “comparación base”.	54
Gráfico 7. Perfiles de temperatura en “salida” en comparación base.....	55
Gráfico 8. Perfiles de velocidad en “exterior” en “comparación alargamiento parte superior”.56	
Gráfico 9. Perfiles de velocidad en “Torre meteorológica” en “comparación alargamiento parte superior”.	57
Gráfico 10. Perfiles de velocidad en “salida” en comparación alargamiento parte superior.....	57
Gráfico 11. Perfiles de temperatura en “exterior” en “comparación alargamiento parte superior”.	58
Gráfico 12. Perfiles de temperatura en “Torre meteorológica” en “comparación alargamiento parte superior”.	58
Gráfico 13. Perfiles de temperatura en “salida” en “comparación alargamiento superior”	58
Gráfico 14. Perfiles de velocidad en “exterior” en “comparación refinado”	60
Gráfico 15. Perfiles de velocidad en “Torre meteorológica” en “comparación refinado”.	61
Gráfico 16. Perfiles de velocidad en “salida” en “comparación refinado”.	61
Gráfico 17. Perfiles de temperatura en “exterior” en “comparación refinado”	62
Gráfico 18. Perfiles de temperatura en “Torre meteorológica” en “comparación refinado”. ...	62
Gráfico 19. Perfiles de temperatura en “salida” en “comparación refinado”.	62
Gráfico 20. Deposición en la línea c243 en “comparación refino”.	63
Gráfico 21. Deposición en la línea c258 en “comparación refino”.	63
Gráfico 22. Deposición en la línea c273 en “comparación refino”.	64

Gráfico 23. Deposición en la línea c288 en “comparación refino”.	64
Gráfico 24. Deposición en la línea c303 en “comparación refino”.	64
Gráfico 25. Perfiles de velocidad característicos para el caso 02/10/12.	78
Gráfico 26. Perfiles de temperatura característicos para el caso 02/10/12.	79
Gráfico 27. Deposición en la línea c333 del caso 02/10/12.	80
Gráfico 28. Perfiles de velocidad característicos del caso 1(18/06/12).	82
Gráfico 29. Perfiles de velocidad característicos del caso 2 (31/07/12).	82
Gráfico 30. Perfiles de velocidad característicos del caso 3 (02/10/12).	83
Gráfico 31. Perfiles de velocidad característicos del caso 4 (22/10/12).	83
Gráfico 32. Perfiles de velocidad característicos del caso 5 (11/01/13).	83
Gráfico 33. Perfiles de velocidad característicos del caso 6 (14/02/13).	84
Gráfico 34. Perfiles de velocidad característicos del caso 7 (26/02/13).	84
Gráfico 35. Perfiles de velocidad característicos del caso 8 (22/03/13).	84
Gráfico 36. Perfiles de velocidad característicos del caso 9 (07/06/13).	85
Gráfico 37. Perfiles de velocidad característicos del caso 10 (13/06/13).	85
Gráfico 38. Perfiles de temperatura característicos del caso 1(18/06/12).	86
Gráfico 39. Perfiles de temperatura característicos del caso 2 (31/07/12).	86
Gráfico 40. Perfiles de temperatura característicos del caso 3 (02/10/12).	87
Gráfico 41. Perfiles de temperatura característicos del caso 4 (22/10/12).	87
Gráfico 42. Perfiles de temperatura característicos del caso 5 (11/01/13).	87
Gráfico 43. Perfiles de temperatura característicos del caso 6 (14/02/13).	88
Gráfico 44. Perfiles de temperatura característicos del caso 7 (26/02/13).	88
Gráfico 45. Perfiles de temperatura característicos del caso 8 (22/03/13).	88
Gráfico 46. Perfiles de temperatura característicos del caso 9 (07/06/13).	89
Gráfico 47. Perfiles de temperatura característicos del caso 10 (13/06/13).	89
Gráfico 48. Línea de deposición c243 del caso 1 (18/06/12).	90
Gráfico 49. Línea de deposición c258 del caso 1 (18/06/12).	90
Gráfico 50. Línea de deposición c273 del caso 1 (18/06/12).	91

Gráfico 51. Línea de deposición c288 del caso 1 (18/06/12).	91
Gráfico 52. Línea de deposición c303 del caso 1 (18/06/12).	91
Gráfico 53. Línea de deposición c318 del caso 1 (18/06/12).	92
Gráfico 54. Línea de deposición c243 del caso 2 (31/07/12).	94
Gráfico 55. Línea de deposición c258 del caso 2 (31/07/12).	94
Gráfico 56. Línea de deposición c273 del caso 2 (31/07/12).	94
Gráfico 57. Línea de deposición c288 del caso 2 (31/07/12).	95
Gráfico 58. Línea de deposición c303 del caso 2 (31/07/12).	95
Gráfico 59. Línea de deposición c273 del caso 3 (02/10/12).	97
Gráfico 60. Línea de deposición c288 del caso 3 (02/10/12).	98
Gráfico 61. Línea de deposición c303 del caso 3 (02/10/12).	98
Gráfico 62. Línea de deposición c318 del caso 3 (02/10/12).	98
Gráfico 63. Línea de deposición c333 del caso 3 (02/10/12).	99
Gráfico 64. Línea de deposición c348 del caso 3 (02/10/12).	99
Gráfico 65. Línea de deposición c3 del caso 3 (02/10/12).	99
Gráfico 66. Línea de deposición c108 del caso 4 (22/10/12).	101
Gráfico 67. Línea de deposición c123 del caso 4 (22/10/12).	101
Gráfico 68. Línea de deposición c138 del caso 4 (22/10/12).	101
Gráfico 69. Línea de deposición c153 del caso 4 (22/10/12).	102
Gráfico 70. Línea de deposición c168 del caso 4 (22/10/12).	102
Gráfico 71. Línea de deposición c108 del caso 5 (11/01/13).	103
Gráfico 72. Línea de deposición c123 del caso 5 (11/01/13).	104
Gráfico 73. Línea de deposición c138 del caso 5 (11/01/13).	104
Gráfico 74. Línea de deposición c153 del caso 5 (11/01/13).	104
Gráfico 75. Línea de deposición c168 del caso 5 (11/01/13).	105
Gráfico 76. Línea de deposición c108 del caso 6 (14/02/13).	106
Gráfico 77. Línea de deposición c123 del caso 6 (14/02/13).	106
Gráfico 78. Línea de deposición c138 del caso 6 (14/02/13).	107

Gráfico 79. Línea de deposición c153 del caso 6 (14/02/13).	107
Gráfico 80. Línea de deposición c168 del caso 6 (14/02/13).	107
Gráfico 81. Línea de deposición c108 del caso 7 (26/02/13).	108
Gráfico 82. Línea de deposición c123 del caso 7 (26/02/13).	109
Gráfico 83. Línea de deposición c138 del caso 7 (26/02/13).	109
Gráfico 84. Línea de deposición c153 del caso 7 (26/02/13).	109
Gráfico 85. Línea de deposición c258 del caso 8 (22/03/13).	110
Gráfico 86. Línea de deposición c273 del caso 8 (22/03/13).	111
Gráfico 87. Línea de deposición c288 del caso 8 (22/03/13).	111
Gráfico 88. Línea de deposición c303 del caso 8 (22/03/13).	111
Gráfico 89. Línea de deposición c318 del caso 8 (22/03/13).	112
Gráfico 90. Línea de deposición c333 del caso 8 (22/03/13).	112
Gráfico 91. Línea de deposición c258 del caso 9 (07/06/13).	114
Gráfico 92. Línea de deposición c273 del caso 9 (07/06/13).	114
Gráfico 93. Línea de deposición c288 del caso 9 (07/06/13).	114
Gráfico 94. Línea de deposición c303 del caso 9 (07/06/13).	115
Gráfico 95. Línea de deposición c318 del caso 9 (07/06/13).	115
Gráfico 96. Línea de deposición c333 del caso 9 (07/06/13).	115
Gráfico 97. Línea de deposición c258 del caso 10 (13/06/13).	117
Gráfico 98. Línea de deposición c273 del caso 10 (13/06/13).	117
Gráfico 99. Línea de deposición c288 del caso 10 (13/06/13).	117
Gráfico 100. Línea de deposición c303 del caso 10 (13/06/13).	118
Gráfico 101. Línea de deposición c318 del caso 10 (13/06/13).	118
Gráfico 102. Línea de deposición c333 del caso 10 (13/06/13).	118
Gráfico 103. Gráfico general de distancia de máxima deposición en función de la velocidad.	124

Índice de tablas

Tabla 1. Comparación del VMD en “comparación refino”	65
Tabla 2. Resumen de las características de las distintas mallas empleadas para el estudio de mallado.....	66
Tabla 3. Resumen de los datos de deposición y VMD obtenidos por el Grupo de Investigación de la UMH de Elche para el caso 02/10/12.....	69
Tabla 4. Resumen de las características principales de los casos simulados.....	77
Tabla 5. Resumen de VMD para el caso 02/10/12.....	81
Tabla 6. Resumen VMD del caso 1 (02/10/12).....	92
Tabla 7. Resumen VMD del caso 2 (31/07/12).....	96
Tabla 8. Resumen VMD del caso 3 (02/10/12).....	100
Tabla 9. Resumen VMD del caso 4 (22/10/12).....	103
Tabla 10. Resumen VMD del caso 5 (11/01/13).....	105
Tabla 11. Resumen VMD del caso 6 (14/02/13).....	108
Tabla 12. Resumen VMD del caso 7 (26/02/13).....	110
Tabla 13. Resumen VMD del caso 8 (22/03/13).....	113
Tabla 14. Resumen VMD del caso 9 (07/06/13).....	116
Tabla 15. Resumen VMD del caso 10 (13/06/13).	119
Tabla 16. Características principales de cada caso.	122
Tabla 17. Velocidad y distancia de máxima deposición en cada uno de los casos.	123
Tabla 18. Resultados de temperatura, humedad y evaporación en los distintos casos.	125

Capítulo 1

Introducción

1.1. Contexto del Proyecto.

Este Proyecto Fin de Carrera está enfocado para que sirva como colaboración del proyecto *“Análisis energético de instalaciones de climatización asociado a la variación del diseño de torres de refrigeración. Control de emisiones y su impacto en áreas urbanas”* ENE2010-21679-C02-01, financiado por el Ministerio de Ciencia e Investigación. Son dos los objetivos principales de este proyecto principal: por un lado, la creación de un modelo numérico capaz de predecir la deposición de las gotas de agua que escapan de una torre de refrigeración, pudiendo así acotar las zonas que pudiesen ser focos de contagio en el caso de que el agua llevará algún agente patógeno, tal como la bacteria *“Legionella”*; por otro lado, el desarrollo de un separador de gotas que minimice la cantidad de agua que escapa de la torre de refrigeración. El proyecto principal cuenta con varias sublíneas de investigación:

- Desarrollo un modelo numérico para de predecir la deposición de las gotas de agua procedentes de la torre de refrigeración, parte de la que se encarga el Grupo de Investigación del departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos de la Universidad Politécnica de Cartagena.
- Estudio experimental de deposición en una torre de refrigeración, realizado por grupo de Investigación de la Universidad Miguel Hernández de Elche, que dispone de una torre de refrigeración piloto.
- Diseño de un prototipo de separador de gotas que minimice el agua arrastrada al exterior por la torre de refrigeración, parte desarrollada en el departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos de la Universidad Politécnica de Cartagena.

Este Proyecto Fin de Carrera se integra dentro del primer punto: el desarrollo de un modelo numérico capaz de predecir el arrastre y la deposición de las gotas emitidas por una torre de refrigeración a la atmósfera en un entorno urbano.

La modelización a desarrollar debe simular el flujo de aire y la dispersión de gotas de agua procedentes de la torre de refrigeración en un entorno urbano que se encuentra en la Universidad Miguel Hernández de Elche, lugar donde está instalado físicamente el prototipo de torre de refrigeración. Es en esta ubicación donde se están llevando a cabo las medidas experimentales de arrastre y deposición de gotas, que serán utilizadas para la validación de nuestras simulaciones numéricas.



Fig. 1. Torre de refrigeración piloto en Campus UMH de Elche.

Una vez validado dicho modelo, se podrá predecir la dispersión de las gotas procedentes de un foco emisor en un entorno urbano, pudiendo particularizar el caso para diferentes entornos urbanos, diferentes condiciones atmosféricas o diferentes características del foco emisor. Pudiendo así delimitar la zona de influencia de cualquier hipotético contaminante o bacteria patógena que pudieran transportar las gotas de agua.

Este trabajo es continuación del Proyecto Fin de Carrera "*Modelización numérica y validación experimental de la deposición de gotas de agua de una torre de refrigeración de tiro mecánico en un entorno urbano*", donde se presentaron los primeros resultados de simulación de este entorno urbano. En esta modelización previa se simuló con éxito la capa límite viscosa en dicho entorno, aunque se detectaron algunos problemas en la determinación de las condiciones de contorno óptimas, así como en el tamaño de dominio y de los elementos de la malla para reproducir fielmente la capa límite térmica. También se detectó la necesidad de extender el número de casos a simular (con diferentes velocidades y direcciones de viento), y de utilizar un mayor número de ensayos experimentales que sirvieran de apoyo para la validación de la modelización.

1.2. Origen del estudio

El problema que motiva el presente Proyecto Fin de Carrera es el riesgo de contaminación que se produce al liberar gotas de agua al ambiente desde las torres de refrigeración. Las torres de refrigeración representan el sistema de enfriamiento con mayor rendimiento, prueba de ello es que su uso en sistemas de refrigeración está muy extendido, sobre todo para equipos de climatización de potencia considerable. Las torres de refrigeración suelen utilizar agua, la cual circula por el circuito de condensación con el fin de extraer el calor del refrigerante que circula por el circuito de refrigeración. En dicho agua pueden formarse colonias de agentes patógenos, tal como la bacteria “*Legionella*”, la cual será liberada al ambiente por medio de las gotas de agua que se escapan de la torre, suponiendo un riesgo para la salud de la población humana cercana a la torre de refrigeración.

La *Legionelosis* es la enfermedad infecciosa causada por la *Legionella* (en un 90% de los casos), y que puede llegar a ser mortal. La enfermedad adquirió su denominación en 1976, cuando apareció un brote epidémico de neumonía entre los participantes de una convección de la Legión americana en Filadelfia. La enfermedad tiene dos formas distintas:

- *La enfermedad del legionario* es el nombre de la forma más severa de infección, que causa neumonía y fiebre alta.
- *Fiebre de Pontiac*, que es una enfermedad más leve y no causa neumonía.

La *Legionella* es una bacteria que habita en las aguas superficiales, en condiciones de temperatura de entre 20°C y 70°C. Habita en lagos y estanques, como parte de su flora bacteriana. Pero en ocasiones también coloniza los sistemas de abastecimiento de las ciudades, entrando en la red de distribución de agua, desde donde llegan a las balsas de las torres de refrigeración. Para evitar que la bacteria forme una colonia en el agua de la torre de refrigeración, es muy importante el mantenimiento, ya que la proliferación de la bacteria *Legionella* se favorece con el estancamiento del agua, lo que produce la acumulación de nutrientes de la bacteria, como lodos y materia orgánica. Otro factor a controlar es la temperatura, ya que 35-37°C es el rango de temperatura óptimo para la multiplicación de la bacteria. Además, las torres de refrigeración cuentan con un mecanismo productor de aerosoles, que permiten a la bacteria dispersarse en el aire, y hacerla susceptible de penetrar en el aparato respiratorio de las personas mediante inhalación.

Por todo lo comentado anteriormente, las administraciones locales están restringiendo o dificultando la instalación de torres de refrigeración.

Las medidas preventivas para evitar la formación de colonias de *Legionella* en las torres de refrigeración se basan en dos principios: por un lado la eliminación o reducción de zonas sucias mediante un correcto diseño y mantenimiento de las instalaciones; por otro lado evitando las condiciones que favorecen la aparición y multiplicación de la *Legionella* (control de la temperatura del agua, desinfección de la misma).

Es importante destacar la importancia del uso de separadores de gotas en las torres de refrigeración, ya que éstos sólo dejan escapar al exterior porcentajes menores del 0.02% de las gotas, reduciendo así la cantidad de gotas emitidas al ambiente, y por lo tanto la de los posibles contaminantes que pudieran transportar las gotas.

1.3. Estado del arte

Recurriendo a la bibliografía, para el problema de transporte y dispersión de aerosoles finos expulsados al medio ambiente por medio de una torre de refrigeración se pueden encontrar estudios experimentales, así como modelos analíticos y numéricos.

Los estudios experimentales más importantes sobre el tema fueron los desarrollados por Policastro et ál. (1978), a partir de las torres de refrigeración de las centrales térmicas de Chalk Point (2640 MW) en Maryland, y Pittsburgh (720 MW). En ambas se empleó un trazador denominado Rodamina, y se midió su deposición en distintas localizaciones cercanas a la fuente de emisión.

Los modelos analíticos más importantes son el *Industrial Source Complex Short Term Versión 3 (ISCST3)*, aprobado por la *Agencia de Protección del Medio Ambiente* de EE.UU. (EPA), y el *Seasonal-Annual Cooling Tower Impact (SACTI)*, desarrollado por el *Electric Power Research Institute*. Ambos modelos incluyen efectos termodinámicos, que podrían afectar a la deposición, pero el problema de estos modelos es que no consideran el entorno en que se encuentra la torre de refrigeración (edificios y otros obstáculos), lo cual impide modelizar el efecto que tendría dichos edificios sobre las trayectorias de las gotas.

En los últimos años, simultáneamente con el desarrollo de la capacidad de los ordenadores, se ha producido el auge de la Mecánica de Fluidos Computacional (CFD), lo que ha propiciado la aparición de modelos numéricos para modelizar la dispersión de las gotas expulsadas de la torre de refrigeración. La ventaja principal de los modelos numéricos es la inclusión de los nuevos modelos de turbulencia, así como de cualquier entorno, pudiendo incluir edificios para estudiar su influencia en las trayectorias. A continuación se describen algunos de los modelos numéricos presentes en la bibliografía.

England et ál. (1973) utilizaron un código 3D para el cálculo del comportamiento del penacho, en seco y húmedo, de una de las torres de refrigeración de la central térmica de Keystone (1711 MW) en Pennsylvania. Asumieron la aproximación de Boussinesq para los efectos térmicos, y tomaron el viento como un valor constante (en dirección y magnitud). Para el caso del penacho seco el error fue mínimo, pero en el caso del penacho húmedo, el modelo daba unos valores de altura del penacho entre 4 y 10 veces mayor a lo medido experimentalmente.

Bergstrom et ál. (1993) realizaron una simulación en dos dimensiones de la interacción del flujo a través de una torre de refrigeración con el flujo de viento sobre la torre. Las paredes de entrada y condiciones de escape se modelaron como estructuras infinitesimales con saltos de presión y velocidades de flujo especificados. Se encontró que los campos fluidos incrementaban el flujo de entrada en el lado de la torre donde chocaba el viento.

Takata et ál. (1996) realizaron un modelo numérico tridimensional para calcular los efectos del viento sobre el penacho húmedo de una torre de refrigeración. Utilizando un modelo de turbulencia $k - \varepsilon$ RNG. Los resultados del modelo se compararon con penachos fotografiados en las torres de refrigeración equivalentes, obteniendo una concordancia bastante buena.

Meroney (2006) desarrolló un modelo numérico de la torre de refrigeración de la central térmica de Chalk Point, con el fin de poder emplear los datos experimentales recogidos por Policastro et ál. (1978) en dicha torre de refrigeración. Dicho modelo incluía la predicción de las trayectorias de las gotas desde un punto de vista Lagrangiano. El dominio empleado era tridimensional sin obstáculos. Más tarde, Meroney (2008) estableció un protocolo para corregir el arrastre en presencia de edificios, para distintas condiciones meteorológicas, y para distintos periodos estacionales.

El trabajo que supone el origen de este proyecto es el realizado por Hernández, M. (2009), dentro del Grupo de Investigación de Ingeniería Térmica y de Fluidos de la Universidad Politécnica de Cartagena. En este trabajo se obtiene numéricamente el flujo y las características del arrastre y deposición de gotas de agua expulsadas por la torre de refrigeración piloto ubicada en el campus de la Universidad Miguel Hernández de Elche. El dominio empleado consistía en un entorno tridimensional de 800x800x200 metros, donde sólo se incluía el edificio donde estaba la torre de refrigeración piloto. Otón, R. (2010) desarrolló un perfil para modelizar más fielmente la capa térmica y viscosa del modelo numérico. Consuegro, A. (2010) amplió el dominio tridimensional a 800x800x400 metros, incluyendo el resto de edificios que componían el entorno de la torre de refrigeración, además mejorar el modelo de la capa atmosférica y viscosa. Consuegro, A. (2012) siguió con el desarrollo de la capa límite térmica y atmosférica, estudiando la influencia de la limitación del ratio de viscosidad en las capas límite térmica y viscosa.

1.4. Objetivos

El objetivo principal de este Proyecto Fin de Carrera consiste en desarrollar una modelización numérica que simule el flujo de aire y la dispersión de gotas de agua procedentes de la torre de refrigeración en el entorno urbano de la Universidad Miguel Hernández de Elche, donde se encuentra instalado el prototipo experimental de torre de refrigeración. Para ello será necesario llevar a cabo un estudio exhaustivo del tamaño del dominio y malla precisos en la simulación, un análisis de las condiciones de contorno óptimas que sean capaces de reproducir tanto la capa límite térmica como la

viscosa, y llevar a cabo una validación de los diferentes casos simulados mediante las medidas experimentales obtenidas en campo en el entorno urbano considerado.

Al tratarse del desarrollo de un modelo numérico, para la realización de este Proyecto Fin de Carrera se usarán diferentes Software: *Fluent*, *Microsoft Excel* y *Matlab* entre otros.

1.5. Planteamiento del proyecto

Una vez introducido el contexto y los objetivos del proyecto, se expone la estructura del proyecto:

El primer capítulo se ha centrado en introducir el tema sobre el que trata este Proyecto Fin de Carrera, así como los trabajos anteriores y los objetivos.

En el Capítulo 2 se presenta el planteamiento físico del problema, describiendo el dominio a estudiar y las ecuaciones matemáticas a emplear, tanto para el flujo atmosférico como para el arrastre de las gotas, así como el acoplamiento entre ambas fases.

En el Capítulo 3 se describe el método computacional empleado, con el cual se resuelven las ecuaciones planteadas en el Capítulo 2. En este tercer capítulo también se incluye una explicación de las condiciones de contorno del modelo numérico, así como el estudio de optimización de la malla a emplear.

En el capítulo 4 se realiza la validación del modelo numérico mediante datos experimentales obtenidos en distintos ensayos en la torre de refrigeración piloto. Anteriormente, y en este mismo capítulo, se explica cómo se realizará la validación: qué variables se evaluarán y dónde.

Por último en el Capítulo 5 se presentan las conclusiones a las que se llegan en este Proyecto Fin de Carrera, en base a los resultados obtenidos tras las diferentes simulaciones.

Capítulo 2

Modelos físicos

2.1. Introducción

El objetivo de este capítulo es presentar el planteamiento físico del problema a resolver y las ecuaciones matemáticas utilizadas.

Primero se expondrá la configuración física del dominio, que no es más que un modelo geométrico del entorno donde se encuentra la torre de refrigeración piloto de la UMH de Elche.

A continuación se describirán las ecuaciones matemáticas que modelizan el flujo atmosférico, así como las que modelizan el arrastre de las gotas por el flujo atmosférico. Con todo ello se tendrán planteadas las ecuaciones que se resolverán numéricamente por el software *Fluent*.

2.2. Configuración física

El dominio sobre el que se aplicarán las ecuaciones a resolver consiste en un prisma rectangular de 800x800x400 metros, en el suelo de la parte central del dominio se encuentran los siete edificios que simulan el entorno urbano de la torre de refrigeración experimental de la UMH de Elche.

Las dimensiones del dominio se han estimado a partir de la longitud característica del problema: 40 m, que es lo que mide de largo la fachada principal del edificio que tiene el prototipo de torre de refrigeración. Para que la entrada del flujo atmosférico no se vea influenciado por la presencia de los edificios, se ha elegido un dominio que tenga 10 veces la longitud característica (400 m) desde el centro del dominio, resultando el dominio de 800x800x400 metros, siendo la última longitud (400 m) la altura del dominio. De manera que los contornos quedan suficientemente alejados de la zona de interés (los edificios). La razón de que aguas abajo de los edificios también se haya elegido una longitud de 400 m es para realizar el estudio completo de las trayectorias de las gotas, ya que bajo condiciones atmosféricas de inestabilidad, pueden ser arrastradas por el aire hasta distancias muy lejanas del foco emisor de donde salieron.

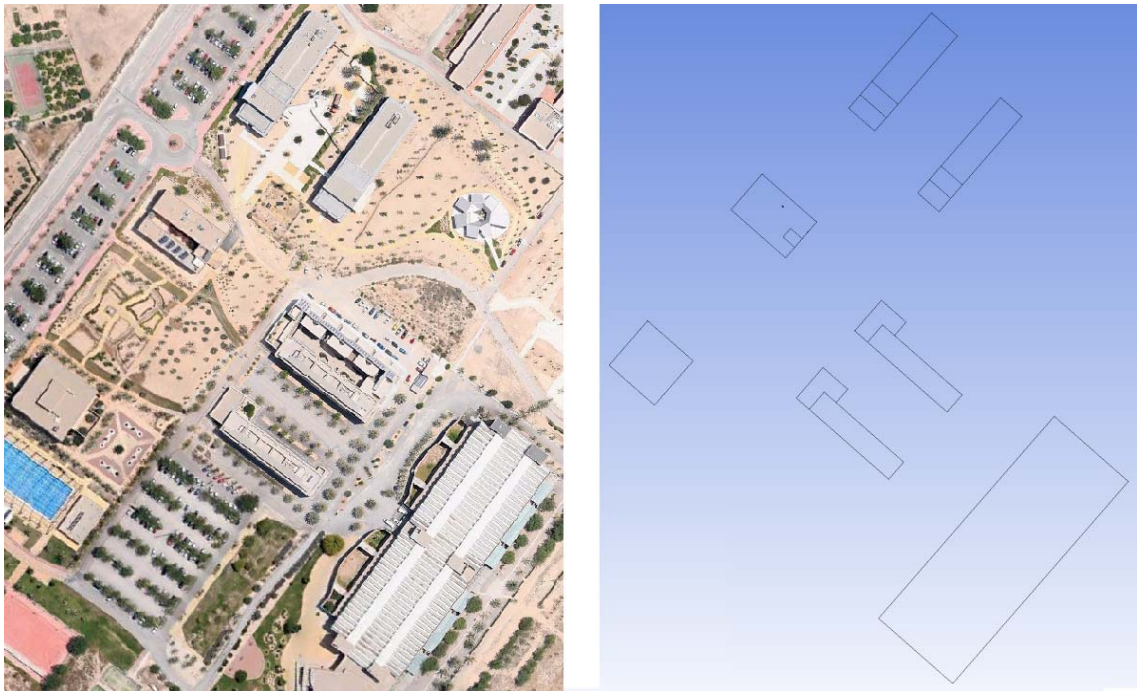


Fig. 2. Edificios del dominio a modelar. A la izquierda la imagen real, a la derecha el modelo geométrico.

Entre los edificios incluidos en el dominio, se encuentra la torre de refrigeración piloto, en donde se harán los ensayos que posteriormente servirán para validar el modelo.

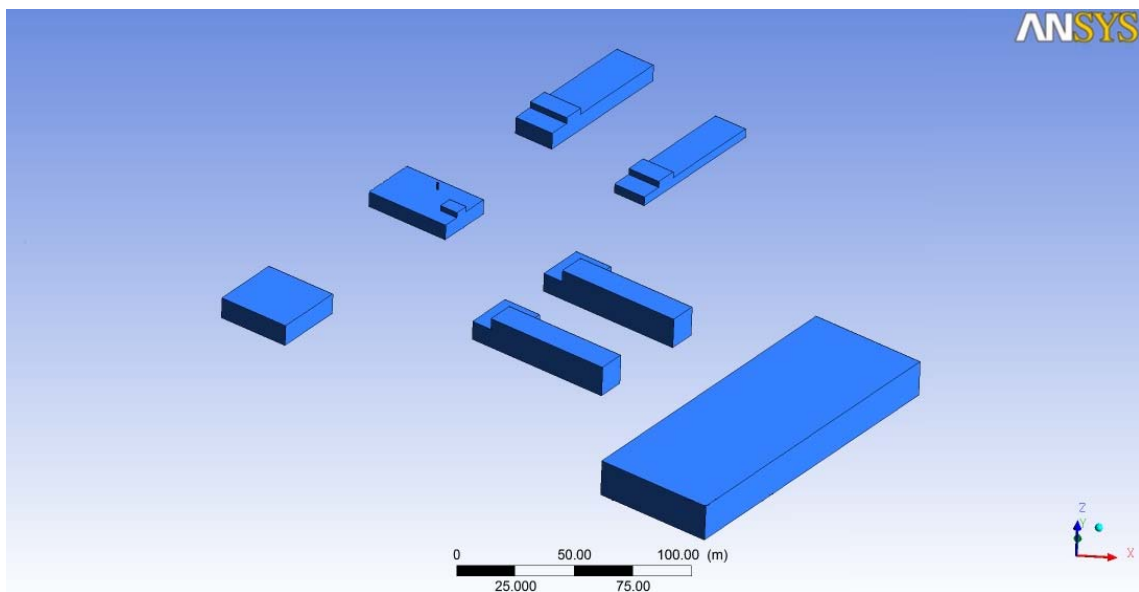


Fig. 3. Modelo geométrico en 3D de los edificios del dominio.

La intención de tener un forma de dominio prismática cuadrangular es para orientar nuestro dominio de manera que el flujo atmosférico entre perpendicular a una cara y salga perpendicularmente por la opuesta, siendo la velocidad principal del flujo paralelo a las otras dos caras laterales del dominio.

El dominio empleado se divide en dos partes, una malla interior en forma de cilindro, y una malla exterior donde se aloja el cilindro. Las superficies laterales de los cilindros (interior y exterior) se definirán como interfaces.

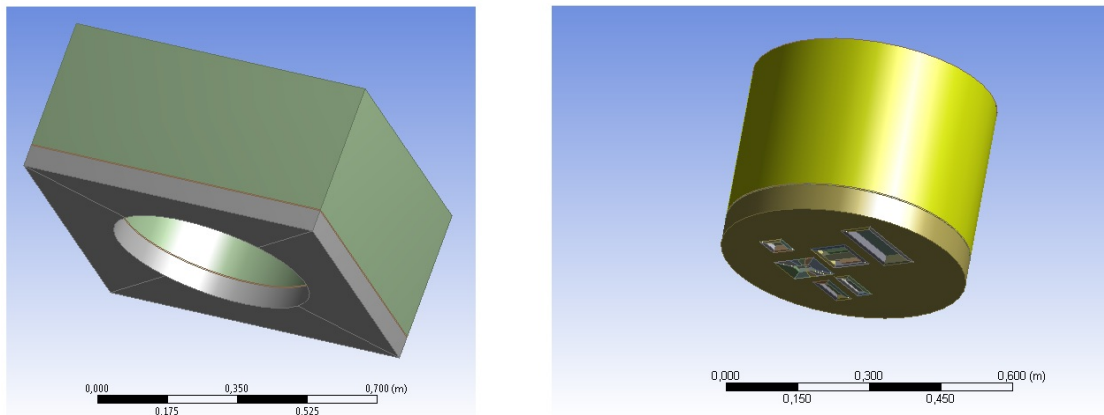


Fig. 4. Geometría exterior (izquierda) e interior (derecha). La interior se introduce en la exterior.

El propósito de dividir la malla en dos partes es doble: por un lado permite simular casos con distintas direcciones de viento, ya que sólo se debería de girar el cilindro interior (manteniendo el flujo paralelo a las caras laterales del exterior). Por otro lado se mejora en la convergencia, ya que simulando el flujo atravesando oblicuamente las paredes exteriores del dominio se tenían problemas de convergencia.

2.3. Modelo matemático flujo atmosférico

Para hallar el modelo matemático del flujo atmosférico, lo primero que se debe de tener en cuenta es que dentro de la atmósfera, nos encontramos en la capa límite atmosférica (*ABL* del inglés: *Atmospheric Boundary Layer*).

En mecánica de fluidos se conoce como capa límite a la región del fluido cercana a una superficie sólida donde los efectos viscosos se hacen predominantes. En ella tiene lugar un intercambio de cantidad de movimiento, produciéndose una gran variación de la velocidad relativa, que se reduce hasta anularse en la superficie del sólido.

Dentro de la *ABL* se considera flujo totalmente turbulento, por lo que se observan bruscas variaciones de velocidad, presión y temperatura. Como consecuencia del mecanismo de mezcla turbulenta los efectos de la fricción superficial, calentamiento del suelo y la evaporación se transmiten rápidamente a toda la *ABL*.

El espesor de la *ABL* depende varios factores como son el calentamiento o la rugosidad del suelo, variando desde 30 a 3000 metros. Para la zona objeto de estudio de este proyecto, Otón, R.A. (2010), obtuvo unos valores de 1246,3 metros empleando las expresiones de Deardorff (1972), y de 722,46 metros empleando las de Venkatram (1980), respectivamente. Ambos valores están por encima de la máxima altura del dominio, 400 m, por lo que se puede concluir que el dominio se encuentra totalmente dentro de la *ABL*.

En este problema de fluidos, además del flujo de fluidos, se tiene transferencia de calor y de masa entre distintas fases. Los principios que rigen nuestro problema son conservación de masa, cantidad de movimiento, energía y especies químicas. Las ecuaciones de Navier-Stokes modelizan matemáticamente los principios de conservación citados anteriormente. Su forma en coordenadas cartesianas es la siguiente:

$$\text{div}(\vec{u}) = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{D\vec{u}}{Dt} = \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \text{div}(\vec{u}\vec{u}) = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \nu\Delta\vec{u} + \vec{f}_m \quad (2.2)$$

$$\rho \frac{De}{Dt} = \rho \frac{\partial e}{\partial t} + \vec{u} \cdot \text{div}(e) = \phi_V + k\Delta T + Q_r \quad (2.3)$$

con:

$$\phi_V = \tau'_{ij} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = 2\mu\gamma_{ij}\gamma_{ji} \quad (2.4)$$

$$\tau'_{ij} = 2\mu\gamma_{ij} = \mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.5)$$

y las ecuaciones de estado:

$$de = c(T)dT \quad (2.6)$$

$$\rho = cte \quad (2.7)$$

La velocidad \vec{u} tiene tres componentes (u, v, w) . Desarrollando por componentes, y particularizando para la ABL, que además de la ya comentada densidad constante, sólo tiene la gravedad como fuerza másica en la coordenada z , y las fuerzas de Coriolis en las direcciones x e y . La ecuación de la energía (2.3) se separa en dos ecuaciones de equilibrio, una para la temperatura (θ) y otra para la humedad (q). Queda:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = f_v - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \Delta u \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -f_u - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \Delta v \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \Delta w \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} = \alpha_h \Delta \theta \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + u \frac{\partial q}{\partial x} + v \frac{\partial q}{\partial y} + w \frac{\partial q}{\partial z} = \alpha_v \Delta q \quad (2.13)$$

Siendo α_h la difusividad térmica, α_v la difusividad del vapor de agua, f es el factor de Coriolis, que cumple: $f = 2\Omega \sin(\phi)$, siendo Ω la velocidad angular de la Tierra y ϕ la latitud geográfica.

Este sistema de ecuaciones en derivadas parciales es capaz de representar matemáticamente los movimientos y fenómenos que tienen lugar en la atmósfera, tanto los de mayor tamaño (miles de kilómetros) como las ondulaciones del flujo atmosférico en la troposfera media y alta (ondas de Rossby), hasta escalas microscópicas (procesos de disipación molecular). Los fenómenos que ocurren en la ABL son de naturaleza turbulenta, el problema se presenta es que si se considerará el flujo turbulento como una jerarquía de remolinos de tamaño muy variado, desde el máximo que permite el tamaño de capa, hasta el mínimo suficiente como para sobrevivir a los efectos de la viscosidad, el coste requerido para resolver el problema sería inviable.

La forma de resolver el problema turbulento es describiendo las propiedades estadísticas, por lo que se necesitará un operador promedio que facilite un sistema de ecuaciones más adecuado para ser integrado. El método de promediado más utilizado es el de Reynolds. Este método descompone una variable del flujo turbulento a , en una parte promedio A , y otra aleatoria a' , de forma que:

$$a = A + a' \quad (2.14)$$

Introduciendo este concepto en el sistema de ecuaciones que se tenía, y respetando las reglas de promediado de Reynolds, resulta un sistema de ecuaciones promediadas a las que se llama RANS (Reynolds-Averaged Navier Stokes equations):

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} = f_v - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \Delta U - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial (\overline{\rho u' u'})}{\partial x} - \frac{\partial (\overline{\rho u' v'})}{\partial y} - \frac{\partial (\overline{\rho u' w'})}{\partial z} \right) \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} = -f_u - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \Delta V - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial (\overline{\rho v' u'})}{\partial x} - \frac{\partial (\overline{\rho v' v'})}{\partial y} - \frac{\partial (\overline{\rho v' w'})}{\partial z} \right) \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + U \frac{\partial W}{\partial x} + V \frac{\partial W}{\partial y} + W \frac{\partial W}{\partial z} = g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \Delta W - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial (\overline{\rho w' u'})}{\partial x} - \frac{\partial (\overline{\rho w' v'})}{\partial y} - \frac{\partial (\overline{\rho w' w'})}{\partial z} \right) \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + U \frac{\partial \theta}{\partial x} + V \frac{\partial \theta}{\partial y} + W \frac{\partial \theta}{\partial z} = \alpha_h \Delta \theta - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial (\overline{\rho \theta' u'})}{\partial x} - \frac{\partial (\overline{\rho \theta' v'})}{\partial y} - \frac{\partial (\overline{\rho \theta' w'})}{\partial z} \right) \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + U \frac{\partial Q}{\partial x} + V \frac{\partial Q}{\partial y} + W \frac{\partial Q}{\partial z} = \alpha_v \Delta Q - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial (\overline{\rho q' u'})}{\partial x} - \frac{\partial (\overline{\rho q' v'})}{\partial y} - \frac{\partial (\overline{\rho q' w'})}{\partial z} \right) \quad (2.20)$$

Es de destacar que ahora aparece un nuevo término en cada una de las ecuaciones de la conservación de cantidad de movimiento, este término incluye los productos promediados de velocidades aleatorias. Estos nuevos términos actúan como esfuerzos turbulentos adicionales en las componentes medias de velocidad U, V y W .

Son nueve términos, pero en realidad sólo hay seis esfuerzos diferentes:

Tres esfuerzos normales:

$$\tau_{xx} = \rho \overline{u'^2} \quad \tau_{yy} = \rho \overline{v'^2} \quad \tau_{zz} = \rho \overline{w'^2} \quad (2.21)$$

y tres esfuerzos cortantes:

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \rho \overline{u'v'} \quad \tau_{xz} = \tau_{zx} = \rho \overline{u'w'} \quad \tau_{yz} = \tau_{zy} = \rho \overline{v'w'} \quad (2.22)$$

Estos esfuerzos adicionales se denominan esfuerzos de Reynolds. Los esfuerzos normales incluyen las varianzas de las componentes de la velocidad u, v, w . Son siempre distintas de cero porque contienen cuadrados de velocidades pulsátiles. Cabría pensar en la idea de que los esfuerzos cortantes son nulos, ya que según las reglas de promediado, el producto promediado $\overline{u'v'}$ de dos componentes fluctuantes aleatorias de la velocidad (por ejemplo u' y v') debería de ser cero. Pero debido a la estructura de los vórtices y torbellinos, no sólo no son cero, sino que además suelen tener valores muy altos en comparación con los esfuerzos viscosos en flujos turbulentos, Versteeg-Malalasekera (2007).

El problema que surge ahora es que se han añadido los términos de divergencia turbulenta, que contienen varianzas y covarianzas desconocidas. Por lo que se tienen más incógnitas que ecuaciones. Este es el denominado “*problema de cierre*”.

Para lograr el cierre del sistema de ecuaciones y tener las mismas ecuaciones que incógnitas se han propuesto varias teorías y aproximaciones. Estas teorías y aproximaciones se pueden agrupar en dos grandes grupos: las aproximaciones de cierre de primer orden, donde los términos de divergencia turbulenta se expresan en función de variables conocidas; y las de orden superior, conocidas como Modelos de Turbulencia, que añaden ecuaciones adicionales al sistema.

Los modelos de turbulencia clásicos se basan en asumir que existe una analogía entre los esfuerzos viscosos y los esfuerzos de Reynolds sobre el flujo medio. Experimentalmente se observa que la turbulencia decae a menos que exista un esfuerzo cortante en el flujo o un aporte continuado de energía cinética, y que los esfuerzos turbulentos aumentan a medida que lo hace la deformación. Fue Boussinesq en 1877 el primero en proponer que los esfuerzos de Reynolds deberían de ir asociados a la deformación media.

Actualmente, los modelos de turbulencia más utilizados son los modelos $k - \varepsilon$ y $k - \omega$. En el Proyecto Fin de Carrera de Consuegro, A.J. (2010) se puede ver una descripción detallada de ambos modelos. Para nuestro modelo numérico se utilizará como ecuación de cierre el modelo turbulento $k - \varepsilon$, ya que es modelo más apropiado por tener un coste computacional no excesivamente alto para tratar

problemas de transición de régimen laminar a turbulento. A continuación se describirá brevemente dicho modelo.

El modelo $k - \varepsilon$ estándar es un modelo semiempírico basado en las ecuaciones de transporte para la energía cinética turbulenta, k , y su promedio de disipación, ε . La ecuación de transporte para k se deriva de forma similar a como se presentó en el apartado anterior, mientras que la ecuación para ε es más bien el producto del análisis dimensional unido a un razonamiento físico que el desarrollo de una ecuación exacta matemática.

En este modelo se utiliza k y ε para definir la escala de velocidad v y la escala de longitud l , representativas de las grandes escalas de la turbulencia:

$$v \sim k^{\frac{1}{2}} \quad l \sim \frac{k^{3/2}}{\varepsilon} \quad (2.23)$$

Se ha utilizado la variable ε propia de los vórtices más pequeños para definir la escala l , propia de los vórtices más grandes. Esto es posible porque para números de Reynolds altos, la tasa de transferencia de energía del flujo medio a los grandes vórtices coincide con la tasa de transferencia de los vórtices grandes a los vórtices pequeños. Así, en este modelo los valores de k y ε están intrínsecamente unidos. Si no se tuvieran números de Reynolds altos, la energía en las diferentes escalas podría aumentar o disminuir sin límite, cosa que no ocurre para flujos totalmente turbulentos, por ello se ha de decir que este modelo es sólo válido para este tipo de flujos.

Siguiendo la definición de escalas anterior, la viscosidad turbulenta de este modelo viene dada por:

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.24)$$

Y las ecuaciones que constituyen el modelo son las siguientes:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\Gamma_\varepsilon}{\rho} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \frac{G_k}{\rho} + \frac{G_b}{\rho} + \frac{S_k}{\rho} \quad (2.25)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\Gamma_\varepsilon}{\rho} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{\rho k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{S_\varepsilon}{\rho} \quad (2.26)$$

donde G_k representa la generación de energía cinética turbulenta debido a los gradientes de velocidad media, G_b es la generación de energía cinética turbulenta debido a la flotación, S_k y S_ε representan los términos fuente de las ecuaciones de transporte, Γ_ε es la difusividad efectiva para la ecuación de ε , que es:

$$\frac{\Gamma_\varepsilon}{\rho} = \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \quad (2.27)$$

Las demás términos son las constantes del modelo, cuyos valores son:

$$C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92, C_{3\varepsilon} = \tanh\left|\frac{v}{u}\right|, C_{\mu} = 0.09, \sigma_{\varepsilon} = 1.3 \text{ y } \sigma_k = 1 \quad (2.28)$$

Siendo u y v las componentes del flujo paralela y perpendicular respectivamente.

A causa de que el modelo no es válido para números de Reynolds bajos, el modelo $k - \varepsilon$ presenta la limitación de no poder predecir la transición de régimen laminar a turbulento, limitación que no presenta el modelo $k - \omega$. Son varios los investigadores que han intentado modificar el modelo para aplicarlo a casos con bajos números de Reynolds (Ince y Launder (1989), Hanjalic y Vasic (1993), Henkes y Hoogendoorn (1995)), pero ninguno pudo conseguir resultados satisfactorios.

En cuanto al tratamiento cerca de la pared, si el número de Reynolds es alto, el flujo cerca de la pared se asemeja al comportamiento universal cerca de la pared, o leyes de pared. Estas leyes son las que utiliza el modelo $k - \varepsilon$ cerca de la pared, para evitar tener que simular el flujo en esta zona, donde la producción y la disipación viscosa no tienen porqué estar equiparadas, y por lo tanto el modelo no es de aplicación.

2.4. Modelo matemático fase discreta

La fase discreta de nuestro problema consiste en el conjunto de pequeñas gotas que salen de la torre de refrigeración. En este apartado se describirán las ecuaciones que modelizan el comportamiento de esas gotas, tanto el movimiento de las gotas (intercambio de cantidad de movimiento), como su transferencia de masa y de calor con el exterior (fase continua). También se incluirá el acoplamiento entre ambas fases (continua y discreta) y el impacto que produce una sobre la otra.

Para el modelado del fluido multifásico existen dos aproximaciones principales: la aproximación de Euler-Euler, y la aproximación de Euler-Lagrange. Para nuestro modelo se utilizará la aproximación Euler-Lagrange, donde la fase continua (aire húmedo) se calcula con las ecuaciones presentadas en el apartado 2.3, mientras que la fase discreta se resuelve mediante un rastreo de un gran número de partículas a través del campo fluido calculado. Las gotas se tratan desde un punto de vista Lagrangiano, y como se ha comentado antes, pueden intercambiar momento, masa y energía con la fase continua.

Antes de presentar las ecuaciones que rigen el comportamiento de la fase discreta, es muy importante remarcar una suposición de este modelo: la fase dispersa ocupa una pequeña fracción del volumen, esto es aceptable incluso si la fase discreta contiene una gran cantidad de masa. Las trayectorias de las gotas son calculadas individualmente en intervalos específicos durante el cálculo de la fase continua.

2.4.1. Ecuaciones del movimiento para las gotas

Para predecir las trayectorias de las gotas, se hará la integración del balance de fuerzas en la gota, escrita desde el punto de vista Lagrangiano. Este balance iguala la resultante de las fuerzas que actúan sobre la gota con su inercia:

$$m_p \frac{d\vec{u}_p}{dt} = \vec{F}_D + \vec{F}_P + \vec{F}_G + \vec{F}_{otras} \quad (2.29)$$

donde cada \vec{F} representa una fuerza por unidad de masa:

- \vec{F}_D es la fuerza de arrastre por unidad de masa:

$$\vec{F}_D = m_p \frac{18}{24} \frac{\rho}{\rho_p} \frac{C_D}{d_p} \frac{d\vec{u}_p}{dt} \|\vec{u} - \vec{u}_p\| (\vec{u} - \vec{u}_p) \quad (2.30)$$

donde u es la velocidad de la fase continua, u_p la de la gota (p de partícula), d_p es el diámetro de la gota, ρ la densidad del fluido, ρ_p la densidad de la gota y C_D el coeficiente de arrastre, que puede ser calculado de varias formas, las más comunes son la siguientes:

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2} \quad (2.31)$$

donde a_1, a_2 y a_3 son constantes que se aplican a partículas esféricas lisas en distintos rangos de Re .

$$C_D = \frac{24}{Re_{esf}} (1 + b_1 Re_{esf}^{b_2}) + \frac{b_3 Re_{esf}}{b_4 + Re_{esf}} \quad (2.32)$$

donde:

$$b_1 = \exp(2.3288 - 6.4581\phi + 2.4486\phi^2) \quad (2.33)$$

$$b_2 = 0.0964 - 0.5565\phi \quad (2.34)$$

$$b_3 = \exp(4.905 - 13.8944\phi + 18.4222\phi^2 - 20.2599\phi^3) \quad (2.35)$$

$$b_4 = \exp(1.41681 + 12.2584\phi - 20.7322\phi^2 + 15.8855\phi^3) \quad (2.36)$$

El factor de forma ϕ , se define como:

$$\phi = \frac{s}{S} \quad (2.37)$$

donde s es el área superficial de una esfera que tuviera el mismo volumen que la partícula, y S es la superficie real de la partícula. Para las gotas se tomará $\phi = 1$, por ser de forma esférica. El número de Reynolds Re_{esf} se calcula a partir del diámetro de la gota.

En el caso de gotas microscópicas, se puede utilizar la siguiente forma de la ecuación de arrastre de Stokes, en donde la fuerza de arrastre por unidad de masa F_D se define como:

$$F_D = \frac{18 \mu}{d_p^2 \rho_p C_c} \quad (2.38)$$

El factor C_c es la corrección de Cunningham a la ley de arrastre de Stokes y se calcula como:

$$C_c = 1 + \frac{2\lambda}{d_p} (1.257 + 0.4e^{-(1.1d_p/2\lambda)}) \quad (2.38)$$

Donde μ es la viscosidad molecular del fluido y λ el camino medio libre molecular.

- El término de fuerzas debidas a la presión es:

$$\vec{F}_p = \int_{\Sigma_p} -p \vec{n} dS = -\frac{m_p}{\rho_p} \nabla p \quad (2.39)$$

- La fuerza gravitatoria sobre las gotas es:

$$\vec{F}_g = m_p \frac{\rho_p - \rho}{\rho_p} \vec{g} \quad (2.40)$$

2.4.2. Dispersión turbulenta de partículas

Debido a la turbulencia de la fase fluida se produce una gran dispersión de partículas, esta dispersión puede ser predicha por medio del modelo de rastreo estocástico de nubes de partículas. Este modelo incluye el efecto de las fluctuaciones de la velocidad instantánea turbulenta en las trayectorias de las partículas (en nuestro caso gotas de agua) mediante el uso de métodos estocásticos. El modelo de nubes de partículas rastrea la evolución estadística de las trayectorias de cada una de las partículas sobre una trayectoria media. Para representar la concentración de partículas en la nube, se usa la función de densidad de población de Gauss sobre la trayectoria media.

En la aproximación del rastreo estocástico se predice la dispersión turbulenta de partículas por medio de la integración de la ecuación de la trayectoria para cada una de las partículas individuales, usando la velocidad instantánea a lo largo del recorrido de la partícula. Si se evalúa un número suficientemente grande de partículas representativas, se pueden tener en cuenta los efectos de la dispersión turbulenta de partículas.

Fluent utiliza un método estocástico (*Random Walk Model*) para determinar la velocidad instantánea de las partículas. En el modelo de trayectorias discretas aleatorias (*Discrete Random Walk (DRW)*), las componentes de la velocidad fluctuante son funciones del tiempo, pero discretizadas por segmentos, es decir, su valor

aleatorio se mantiene constante en un intervalo de tiempo dado por la vida media característica de los torbellinos.

El modelo *DRW* simula la interacción de una partícula con una sucesión de torbellinos turbulentos en la fase discreta. Cada torbellino se caracteriza por:

- Una distribución Gaussiana para las fluctuaciones de velocidad aleatoria u', v' y w' .
- Una escala de tiempo τ_e .

Los valores de las fluctuaciones de velocidad aleatoria u', v' y w' , que prevalecen durante el tiempo de vida de los remolinos, son muestreados asumiendo que obedecen a una distribución de probabilidad de Gauss, de forma que:

$$u' = \zeta \sqrt{u'^2} \quad (2.41)$$

donde ζ es un número aleatorio que sigue una distribución normal de probabilidad, y $\sqrt{u'^2}$ es la media geométrica de las fluctuaciones de velocidad. Ya que la energía cinética turbulenta es conocida en todos los puntos del campo fluido, esos valores pueden ser definidos como:

$$\sqrt{u'^2} = \sqrt{v'^2} = \sqrt{w'^2} = \sqrt{2k/3} \quad (2.42)$$

Para el modelo de turbulencia usado (k - ε), cuando se usa la media geométrica se induce la anisotropía de los esfuerzos en la derivación de las fluctuaciones de velocidad:

$$u' = \zeta \sqrt{u'^2} \quad (2.43)$$

$$v' = \zeta \sqrt{v'^2} \quad (2.44)$$

$$w' = \zeta \sqrt{w'^2} \quad (2.45)$$

El tiempo de vida característico de los remolinos se define como una constante:

$$\tau_e = 2T_L \quad (2.46)$$

donde T_L es el tiempo integral Lagrangiano del fluido:

$$T_L = C_L \frac{k}{\varepsilon} \quad (2.47)$$

donde C_L debe ser determinado, pero que en el caso del modelo de turbulencia k - ε se puede obtener que:

$$T_L \approx 0.15 \frac{k}{\varepsilon} \quad (2.48)$$

Se supone que la partícula interactúa con los torbellinos de la fase fluida durante el menor tiempo de vida del torbellino, cuando ese tiempo es alcanzado se calcula un nuevo valor de la velocidad instantánea, aplicando un nuevo valor de ζ a la ecuación (2.41).

2.4.3. Leyes de intercambio de masa y calor

En esta sección se presentarán las leyes de intercambio de masa y calor entre la fase continua y discreta. Primero se expondrán las leyes de calentamiento o enfriamiento inerte, aplicables cuando la gota aún no ha alcanzado la temperatura de vaporización, por lo que sólo hay transferencia de calor. A continuación se presentarán los modelos que rigen la evaporación de la gota, que se producen cuando la gota alcanza la temperatura de vaporización, entrando en juego las leyes de intercambio de masa entre la fase discreta y la continua.

Calentamiento o enfriamiento inertes

Como antes se ha comentado, las leyes de calentamiento o enfriamiento inertes son aplicables cuando la temperatura de la gota es menor que la temperatura de vaporización T_{vap} . Es decir:

$$T_p < T_{vap} \quad (2.49)$$

siendo T_p la temperatura de la partícula (en nuestro caso las gotas de agua). La temperatura de vaporización ha de ser definida. Si la temperatura de la partícula crece hasta alcanzar la temperatura de vaporización, momento en que no serán aplicables las leyes de calentamiento o enfriamiento inertes por existir intercambio de masa.

La ecuación que rige el calentamiento o enfriamiento inerte consiste en un balance entre el calor que se transfiere a la gota (por convección y radiación) y la energía que transfiere la gota mediante la variación de su temperatura T_p :

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_\infty - T_p) + \epsilon_p A_p \sigma (\theta_R^4 - T_p^4) \quad (2.50)$$

donde:

$m_p \equiv$ masa de la gota (kg)

$c_p \equiv$ capacidad calorífica de la gota (J/kg · K)

$h \equiv$ coeficiente de convección (W/m² · K)

$A_p \equiv$ área superficial de la gota (m²)

$T_\infty \equiv$ la temperatura local de la fase continua (K)

$\epsilon_p \equiv$ la emisividad de la partícula (adimensional)

$\sigma \equiv$ la constante de Stefan – Boltzman ($5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$)

$\theta_R \equiv$ temperatura de radiación (K)

La ecuación (2.50) se integra en el tiempo usando una aproximación lineal, en la que se asume que la temperatura de la gota cambia lentamente desde un valor a otro:

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = A_p \{ -(h + \epsilon_p \sigma T_p^3) + hT_\infty + \epsilon_p \sigma \theta_R^4 \} \quad (2.51)$$

A la vez que se calcula la trayectoria de la gota se integra la ecuación anterior para obtener la temperatura de la gota en los instantes consecutivos, resultando:

$$T_p(t + \Delta t) = \alpha_p + [T_p(t) - \alpha_p] e^{-\beta_p \Delta t} \quad (2.52)$$

donde Δt es el incremento de tiempo, y :

$$\alpha_p = \frac{hT_p(t) + \epsilon_p \sigma \theta_R^4}{h + \epsilon_p \sigma T_p^3(t)} \quad (2.53)$$

$$\beta_p = \frac{A_p (h + \epsilon_p \sigma T_p^3)}{m_p c_p} \quad (2.54)$$

El coeficiente de transferencia de calor por convección h , se obtiene mediante la correlación de Ranz y Marshall para el número de Nusselt:

$$Nu = \frac{h d_p}{k_\infty} = 2.0 + 0.6 Re_d^{1/2} Pr^{1/3} \quad (2.55)$$

donde:

$d_p \equiv$ diámetro de la gota (m)

$k_\infty \equiv$ conductividad térmica de la fase continua ($\text{W/m} \cdot \text{K}$)

$Re_d \equiv$ número de Reynolds basado en la gota y la velocidad relativa

$Pr \equiv$ Número de Prandtl de la fase continua ($c_p \mu / k_\infty$)

Evaporación de la gota

La evaporación de la gota se produce en un rango de temperaturas, comienza a producirse cuando la gota alcanza la temperatura de vaporización T_{vap} , y continúa hasta que la gota llega a la temperatura de ebullición T_{bp} , o hasta que la gota es totalmente consumida:

$$T_{vap} \leq T_p \leq T_{bp} \quad (2.56)$$

Durante este proceso, el nivel de evaporación está condicionado por el gradiente de difusión, con el flujo de vapor en la fase gaseosa, que está relacionado con la diferencia de concentraciones de vapor entre la superficie de la gota y la masa de aire:

$$N_i = k_c (C_{i,s} - C_{i,\infty}) \quad (2.57)$$

siendo:

$$N_i \equiv \text{flujo molar de vapor (kmol/m}^2\text{s)}$$

$$k_c \equiv \text{coeficiente de transferencia de masa (m/s)}$$

$$C_{i,s} \equiv \text{concentración de vapor en la superficie de la gota (kmol/m}^3\text{)}$$

$$C_{i,\infty} \equiv \text{concentración de vapor en la masa de aire (kmol/m}^3\text{)}$$

En *Fluent*, la ley de vaporización supone que N_i es positivo (evaporación). Si se dan condiciones en la que N_i es negativo (por ejemplo en el caso de que la temperatura bajara por debajo del punto de rocío y hubiera condiciones de condensación), se tratará la gota como inerte ($N_i = 0$).

La concentración de vapor en la superficie $C_{i,s}$ se calcula suponiendo que la presión de vapor en la interfaz es igual a la presión de vapor saturado p_{sat} , a la temperatura de la gota T_p :

$$C_{i,s} = \frac{p_{sat}(T_p)}{RT_p} \quad (2.58)$$

donde R es la constante universal de los gases ($0.082 \text{ atm} \cdot \text{m}^3/\text{kmol} \cdot \text{K}$)

La concentración de vapor en la masa de aire $C_{i,\infty}$ se conoce por la solución de la ecuación del transporte de la especie i (agua en nuestro caso):

$$C_{i,\infty} = X_i \frac{p}{RT_\infty} \quad (2.59)$$

siendo X_i la fracción molar de la especie i (agua), p es la presión local (absoluta) y T_∞ es la temperatura seca del aire. El coeficiente de transferencia de masa en la ecuación (2.59) se convierte en un término fuente para la especie i (agua) en la ecuación de transporte correspondiente a la fase continua.

La reducción de la masa de la gota se registrará de acuerdo con:

$$m_p(t + \Delta t) = m_p(t) - N_i A_p M_{w,i} \Delta t \quad (2.60)$$

donde:

$$M_{w,i} \equiv \text{peso molecular de la especie } i \text{ (vapor de agua) (kg/kmol)}$$

$$m_p \equiv \text{masa de la gota (kg)}$$

$A_p \equiv \text{área superficial de la gota (m}^2\text{)}$

La variación de la temperatura de la gota está relacionada con la transferencia de calor, tanto calor sensible, como calor latente entre la gota y la fase continua. El siguiente balance nos lo muestra:

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_\infty - T_p) + \frac{dm_p}{dt} h_{fg} + \epsilon_p A_p \sigma (\theta_R^4 - T_p^4) \quad (2.61)$$

donde:

$m_p \equiv \text{masa de la gota (kg)}$

$c_p \equiv \text{capacidad calorífica de la gota (J/kg} \cdot \text{K)}$

$T_p \equiv \text{temperatura de la gota (K)}$

$h \equiv \text{coeficiente de convección (W/m}^2 \cdot \text{K)}$

$A_p \equiv \text{área superficial de la gota (m}^2\text{)}$

$T_\infty \equiv \text{la temperatura local de la fase continua (K)}$

$h_{fg} \equiv \text{calor latente (J/Kg)}$

$\epsilon_p \equiv \text{la emisividad de la partícula (adimensional)}$

$\sigma \equiv \text{la constante de Stefan – Boltzman (5.67} \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4\text{)}$

$\theta_R \equiv \text{temperatura de radiación (K)}$

Vemos que este balance (2.61) es muy similar al (2.51), sólo que éste incluye la variación de energía por evaporación (calor latente).

2.4.4. Acoplamiento entre la fase continua y discreta

Para el acoplamiento entre la fase continua y discreta se tienen dos alternativas principales:

- Aproximación desacoplada (*one-way coupling*): Se resuelve el problema de la fase continua, que servirá para resolver el problema de la fase discreta. En esta aproximación se considera que la fase discreta no influye en la continua (es invariante).
- Aproximación acoplada (*two-way coupling*): Se tiene en cuenta el efecto de la fase discreta sobre la continua. El cálculo consiste en un proceso iterativo, donde se alternan las iteraciones de las ecuaciones de la fase continua e iteraciones de las ecuaciones de la fase discreta, hasta que se alcanza una solución acoplada convergida.

En la aproximación acoplada, a la vez que se calcula la trayectoria de las partículas, el algoritmo tiene en cuenta el momento, calor y masa ganada o pérdida por la partícula; esos valores serán tenidos en cuenta en la siguiente iteración de la fase continua. Las ecuaciones de la fase continua serán ligeramente modificadas, para que incluyan los efectos de la fase discreta. Dicha adaptación consiste en añadir los términos fuentes en las ecuaciones de continuidad, conservación del momento y conservación de la energía. Dichos términos fuentes modelizan la aportación de la fase discreta a la continua:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = S_{i'} \quad (2.62)$$

$$\rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) \delta_{ij} \right] + \rho g_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + F_i \quad (2.63)$$

$$\rho u_i \frac{\partial e}{\partial x_i} = -p \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \Phi_V + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\Sigma_{i'}^n h_{i'} J_{i'}) + S_h \quad (2.64)$$

$$\rho u_i \frac{\partial m_{i'}}{\partial x_i} = - \frac{\partial J_{i',i}}{\partial x_i} + S_{i'} \quad (2.65)$$

donde $S_{i'}$, F_i y S_h representan los términos fuente; $J_{i',i}$ es el flujo de difusión de la especie i' . El flujo es considerado turbulento en todo el dominio, debido a la influencia del viento.

El término fuente de la ecuación de la continuidad es:

$$S_{i'} = \frac{\Delta m_p \dot{m}_{p0}}{m_{p0} dV} \quad (2.66)$$

siendo Δm_p la variación de de la masa de la gota en cada diferencial de volumen dV , en un diferencial de tiempo dt ; \dot{m}_{p0} es el gasto másico inicial de la gota inyectada, y m_{p0} la masa inicial de la gota. Δm_p se puede expresar como:

$$\Delta m_p(dV) = m_p(t) - m_p(t - dt) = N_v M_v A_p dt \quad (2.67)$$

donde $dt = ds/|V_p + V|$ y ds es la fracción de trayectoria dentro de cada volumen diferencial dV ; M_v es el peso molecular del vapor de agua, A_p el área de la gota, y N_v el flujo molar de vapor:

$$N_v = K_C(C_{v,s} - C_v) \quad (2.68)$$

siendo $C_{v,s}$ la concentración de vapor en la superficie de la gota, y C_v la concentración de vapor en la masa de aire:

$$C_{v,s} = \frac{p_{v,s}(T_p)}{R(T_p)} \quad (2.69)$$

$$C_v = \frac{px_v}{RT} \quad (2.70)$$

donde x_v es la fracción másica de vapor, K_C es el coeficiente de transferencia de masa, que se obtiene por una correlación para el número de Nusselt dada por Ranz-Marshall (1952):

$$K_C = \frac{Nu D_{v,m}}{D_p} \quad (2.71)$$

donde $D_{v,m}$ es y D_p . El número de Nusselt Nu es:

$$Nu = (2 + 0.6 \cdot Re^{1/2} \cdot S_c^{1/3}) \quad (2.72)$$

siendo Re el número de Reynolds basado en el diámetro, y S_c es número de Schmidt:

$$S_c = \frac{\nu}{D} \quad (2.73)$$

donde ν es la viscosidad cinemática y D la difusividad másica.

Los términos fuente de la ecuación de la conservación del momento F_i , y de la ecuación de la conservación de la energía S_h están dados por:

$$F_i = \left(\frac{18\mu C_D Re}{24\rho_p D_p^2} (V - V_p) + g \frac{(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \frac{\rho}{\rho_p} V_p \frac{\partial V}{\partial r_p} \right) \frac{\dot{m}_{p0} dt}{dV} \quad (2.74)$$

$$S_h = \left[\frac{\bar{m}_p}{m_{p0}} C_p \Delta T_p + \frac{\Delta m_p}{m_{p0}} \left(-h_f + \int_{T_{ref}}^{T_p} C_{p,i} dT \right) \right] \frac{\dot{m}_{p0}}{dV} \quad (2.75)$$

donde \bar{m}_p es la masa media de la gota en el volumen de control dV , y ΔT_p es la variación de la temperatura de la de la partícula en dicho volumen.

Capítulo 3

Modelo numérico.

3.1. Introducción

Son varias las metodologías que se pueden emplear para resolver un problema de mecánica de fluidos: método analítico, método experimental, método numérico y método híbrido. Mediante el método analítico es posible llegar a conseguir la solución exacta, pero son muy pocos los problemas que pueden abordarse con este método, debido a la dificultad que supone resolver matemáticamente las ecuaciones en derivadas parciales que rigen el comportamiento del flujo. El método experimental es muy usado, pero presenta el problema de las incertidumbres inherentes al proceso de medida. Con el desarrollo de la capacidad de los ordenadores, el método numérico está experimentando un proceso de expansión, ya que es capaz de proporcionar abundante información del problema. El método híbrido es una mezcla de los otros tres métodos.

Este trabajo se ha abordado a través de una combinación de las tres primeras metodologías. Se ha empleado la solución analítica proporcionada para problemas más básicos como punto de partida para el conocimiento general del problema tratado. Por medio de fuentes bibliográficas, se ha recogido información aplicable a nuestro problema, información obtenida experimentalmente por otros investigadores. Por último, en el presente Proyecto Fin de Carrera se desarrolla un modelo numérico, que una vez validado por medio de las medidas experimentales, proporcionará la información necesaria para resolver el problema inicialmente planteado. En este capítulo se describirá el modelo numérico empleado.

Primero se hará una breve introducción al código empleando “*Fluent*”, presentando el funcionamiento general del mismo.

Se continuará explicando la resolución de modelos numéricos, los pasos que se usan, para a partir de un dominio, sus condiciones de contorno y las ecuaciones matemáticas de comportamiento vistas en el capítulo anterior, llegar a un sistema de ecuaciones algebraicas. También se explicará cómo se simplifica el sistema de ecuaciones obtenido, y los algoritmos utilizados para resolverlo.

Una vez presentado como se resuelve el problema, se explicarán las condiciones de contorno usadas para simular los casos.

Por último se hará un estudio sobre la influencia del tamaño de los elementos de la malla en el resultado, con el fin de obtener una malla más ligera (con menos coste computacional), pero que proporcione los mismos resultados que otra malla con más elementos.

3.2. Descripción general del código *Fluent*

Fluent es un código de ordenador capaz de simular multitud de flujos de fluidos, utilizando el método de volúmenes finitos. El código fue desarrollado por la empresa *Fluent.inc*, ahora perteneciente a *Ansys*. Este código puede simular geometrías 2D o 3D, flujos compresibles o incompresibles, estacionarios o transitorios, laminares o turbulentos, flujos turbulentos, con especies químicas, entre otros. El código es usado en multitud de aplicaciones, algunas de ellas son aeroespaciales, automovilísticas, medioambientales y resistencia al fuego.

La resolución numérica de un problema de mecánica de fluidos requiere tres etapas esenciales:

- Preproceso: etapa en la que se construye la geometría, y se discretiza en volúmenes finitos. Se utilizará el programa *SolidWorks* para construir la geometría, y los programas *Icem* y *Tgrid* para realizar la discretización del dominio (mallado).
- Proceso: consiste en la aplicación de las ecuaciones que modelan el flujo a cada uno de los elementos de la malla, la discretización de las ecuaciones, y la posterior resolución del sistema de ecuaciones algebraicas resultantes por medio de métodos numéricos. Para el proceso se utilizará el anteriormente presentado código *Fluent*.
- Postproceso: consiste en obtener los resultados de interés del problema, y procesarlos si es necesario. En este caso se realizará mediante los programas *Fluent*, *CFD-Post*, *Microsoft Excel* y *Matlab*.

Con todo lo explicado anteriormente, el proceso completo para la simulación del problema de flujo de fluidos, objeto de este proyecto, mediante un modelo numérico es el siguiente: En el programa informático *SolidWorks* se crea la geometría del problema a simular. La geometría se exporta a *Icem*, donde es discretizada (mallada), es importante tener en cuenta que el tamaño y la forma de mallado pueden tener influencia sobre el resultado de la simulación, y sobre el coste computacional de la resolución, por lo que es importante cerciorarse de que la malla no tenga influencia sobre el resultado mediante un estudio de mallado. La malla se exporta a *Fluent*, donde se seleccionan los modelos a aplicar para la resolución: con o sin energía, transitorio o estacionario, compresible o incompresible, monofásico o multifásico, entre otros. Una vez seleccionados los modelos de resolución se introducen las condiciones de contorno. A continuación se selecciona el modelo de resolución numérica, para ello *Fluent* dispone de diferentes esquemas de discretización de

primer, segundo y tercer orden, atendiendo al error de truncamiento de la serie de Taylor (*Upwind de primer orden*, *Upwind de segundo orden*, *ley potencial*, y *Quick*), así como diferentes esquemas para el acoplamiento presión-velocidad (*Simple*, *Simplec*, *Presto* y *Coupled*). La descripción de estos esquemas y la discusión sobre la conveniencia de cada uno de ellos se puede encontrar en Versteeg-Malalasekera (2007). Una vez especificado el modelo de resolución numérica, se procede al cálculo, realizado por medio de un algoritmo iterativo. Una vez acabado el cálculo, se tiene una malla dividida en elementos, cada uno de ellos con un valor de cada una de las variables solución del problema (presión, velocidad, temperatura, energía cinética turbulenta. etc.), el postproceso consiste en obtener las variables de interés en los puntos de interés de nuestro problema.

A continuación se describe brevemente el método de resolución numérica empleado en este Proyecto Fin de Carrera.

3.3. Resolución de modelos

Las ecuaciones diferenciales que rigen el flujo de fluidos, obedecen a un balance, las ecuaciones de Navier-Stokes presentadas en el capítulo 2 muestran los tres principios de conservación: de masa, de cantidad de movimiento y de energía. Así, cualquier ecuación de conservación en Mecánica de Fluidos puede ponerse como:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \text{div}(\rho\vec{u}\phi) = \text{div}(\Gamma\text{grad}\phi) + S_\phi \quad (3.1)$$

donde el primer término representa el término transitorio, el segundo el convectivo, el tercero el difusivo, y el cuarto el término fuente, ρ es la densidad del fluido, ϕ es la variable que recibe el balance (variable dependiente) y Γ el coeficiente de difusión. Sobre la ecuación anterior aplicada a cada una de las ecuaciones a resolver (conservación de masa, cantidad de movimiento y energía), se aplica la técnica de volúmenes finitos, que tiene tres puntos fundamentales:

- División del dominio en volúmenes de control no solapados entre sí.
- Integración de las ecuaciones de conservación en cada uno de los volúmenes de control individuales del dominio, con el objetivo de construir ecuaciones algebraicas para las variables dependientes discretas, tales como velocidad, presión y temperatura entre otros.
- Linealización de las ecuaciones discretizadas y resolución del sistema de ecuaciones resultante para obtener los valores de las variables dependientes.

A continuación se procede a describir cada uno de los puntos anteriores, describiendo así como se resuelve el modelo numérico.

3.3.1. Discretización del dominio

Como se ha comentado anteriormente, el primer paso del método consiste en dividir el dominio en volúmenes de control discretos. Para ello se parte de la geometría que representa el dominio del problema. Los métodos de mallado son varios, pudiendo generar mallas estructuradas (su conectividad sigue un patrón reticular, sólo posibles en geometrías sencillas), o no estructuradas (se desarrollan según el contorno de la geometría).

Se ha de tratar de optimizar la malla, generando una malla con no demasiados elementos (ahorra coste computacional), pero suficientemente refinada en las zonas de grandes gradientes de las variables a estudiar, y evitando que sus elementos presenten grandes deformaciones, en este modelo numérico se usarán exclusivamente elementos hexaédricos.

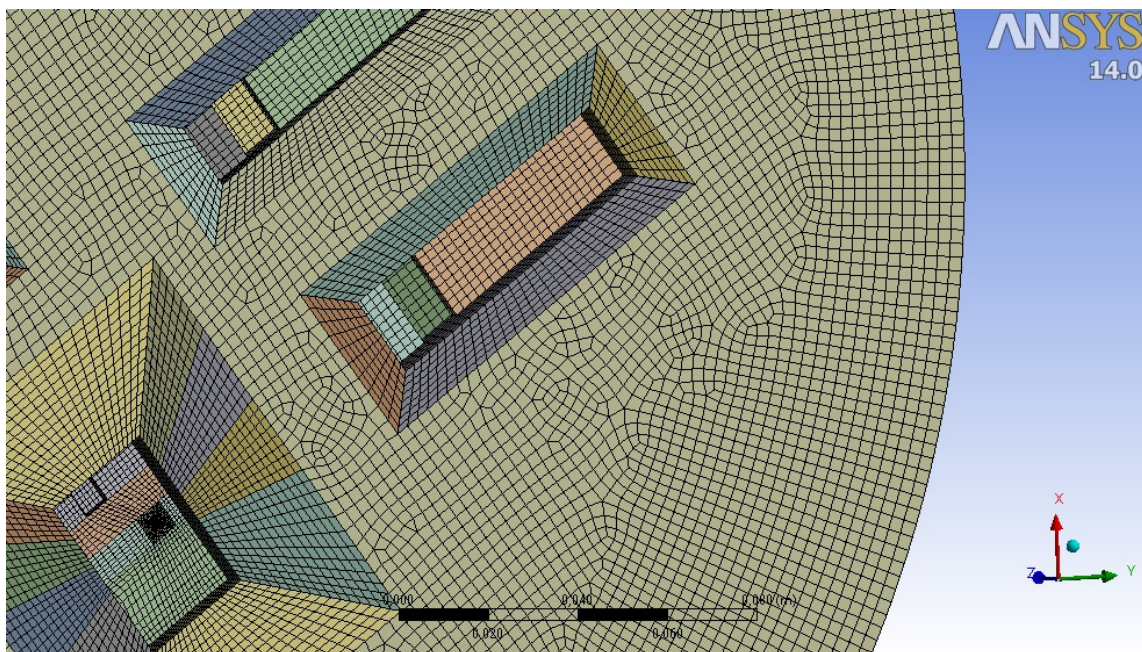


Fig. 5. Detalle de los elementos hexaédricos utilizados en la malla.

Cada volumen de control discreto tiene un nodo, donde se obtendrá el valor de la variable dependiente estudiada. Las caras de los volúmenes de control se encuentran a medio camino entre dos nodos adyacentes. Las caras exteriores de los volúmenes de control que se encuentren en los extremos del dominio, coincidirán con las caras exteriores del dominio, luego las condiciones de contorno se aplicarán en realidad en las caras exteriores de los dominios exteriores. La nomenclatura aplicada a un elemento 2D se presenta en la figura 6. El punto P representa el nodo del volumen de control. Los nodos adyacentes se representan por las letra mayúsculas N,S,E,W (según la posición respecto a P), y las caras exteriores se representan con las letras n,s,e,w (según el nodo adyacente):

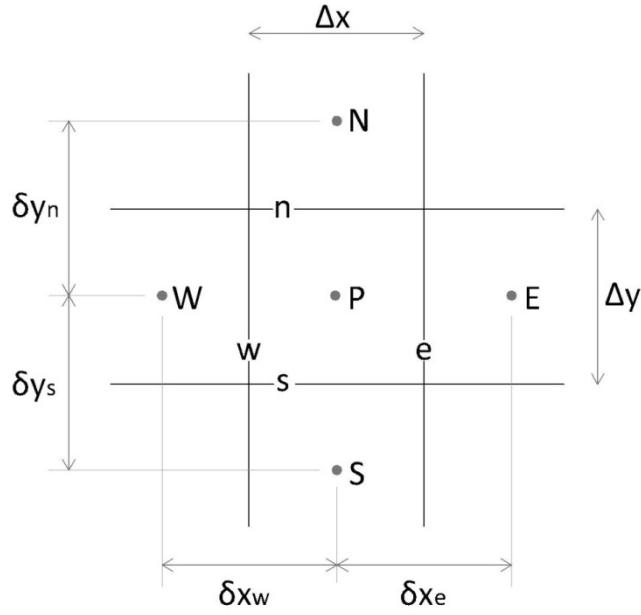


Fig. 6. Esquema de la nomenclatura para un volumen de control en una malla cartesiana bidimensional.

3.3.2. Integración de las ecuaciones de conservación para cada volumen finito

El siguiente paso es la integración de las ecuaciones de conservación sobre cada uno de los volúmenes de control, para alcanzar una ecuación en cada punto P. Esta técnica integra las ecuaciones de conservación para cada volumen de control, dando lugar a ecuaciones discretas que conservan la cantidad física. Es en este paso donde se manifiesta la ventaja de los modelos numéricos frente a los analíticos, ya que se transforman las ecuaciones de conservación (ecuaciones en derivadas parciales (*EDP*)), en ecuaciones algebraicas que se pueden resolver numéricamente.

Suponiendo régimen estacionario, para el volumen genérico antes definido, la integración es la siguiente:

$$\int_A \vec{n} \cdot (\rho \vec{u} \phi) dA = \int_A \vec{n} \cdot (\Gamma \text{grad} \phi) dA + \int_{VC} S_\phi dV \quad (3.1)$$

donde, al igual que antes, el primer término representa el flujo convectivo de ϕ a través de la superficie del volumen de control, el segundo el flujo difusivo y el tercero el término fuente (generación o destrucción de la propiedad ϕ en el volumen de control). En nuestro dominio, que es un problema unidimensional estacionario, la superficie S está rodeada de las caras e y w, por lo que el término convectivo queda:

$$\int_A \vec{n} \cdot (\rho \vec{u} \phi) dA = (\rho \vec{u} \phi A)_e - (\rho \vec{u} \phi A)_w \quad (3.2)$$

el término de difusión:

$$\int_A \vec{n} \cdot (\Gamma \text{grad} \phi) dA = (\Gamma \frac{d\phi}{dt} A)_e - (\Gamma \frac{d\phi}{dt} A)_w \quad (3.3)$$

y para la fuente:

$$\int_{VC} S_\phi dV = \bar{S} \Delta V \quad (3.4)$$

Esquema de diferencias centrales

Volviendo al término de difusión, para desarrollarlo se necesita conocer el valor del coeficiente de difusión Γ , y los gradientes de la propiedad ϕ en las caras. Siguiendo con el método establecido, los valores de Γ y ϕ que se buscan, deben de ser evaluados en los nodos. Para evaluar los gradientes en las caras se utiliza una distribución aproximada de las propiedades definidas en los nodos. En este caso, las aproximaciones lineales son la forma más obvia y simple de calcular los valores en las caras y los gradientes. Esta práctica se conoce como diferencias centrales. Tras la interpolación lineal, los valores Γ_e y Γ_w quedan de la siguiente forma:

$$\Gamma_w = \frac{\Gamma_W + \Gamma_P}{2} \quad (3.5)$$

$$\Gamma_e = \frac{\Gamma_E + \Gamma_P}{2} \quad (3.6)$$

con lo que los términos del flujo difusivo quedarían:

$$(\Gamma \frac{d\phi}{dt} A)_e = \Gamma_e A_e \left(\frac{\phi_E - \phi_P}{\delta x_e} \right) \quad (3.7)$$

$$(\Gamma \frac{d\phi}{dt} A)_w = \Gamma_w A_w \left(\frac{\phi_E - \phi_W}{\delta x_w} \right) \quad (3.8)$$

El término fuente, en situaciones prácticas, puede ponerse generalmente como una función de la variable dependiente ϕ .

$$\bar{S} \Delta V = S_u + S_P \phi_P \quad (3.9)$$

Los términos que resultan más complicados de discretizar son los convectivos, debido a las dificultades que presenta el cálculo del valor de la propiedad transportada ϕ en las caras del volumen de control, así como el flujo convectivo de esta propiedad a través de las fronteras (se han de suponer los valores de velocidad en las caras, ya que no se conoce su valor). Lo que se hace es definir dos variables intermedias, por un lado el flujo másico convectivo por unidad de área ($F = \rho u$), y por otro lado el coeficiente de difusión por unidad de longitud ($D = \Gamma / \delta x$) en las caras de la celda. Además se considera $A_E = A_S = A$. Con todas las definiciones y consideraciones anteriores, el término convectivo queda:

$$(\rho \vec{u} \phi A)_e - (\rho \vec{u} \phi A)_w = F_E \phi_E A - F_w \phi_w A \quad (3.10)$$

Con todas las simplificaciones y consideraciones realizadas, la discretización del balance (3.1) queda:

$$F_E \phi_E A - F_W \phi_W A = \left(\frac{\Gamma_E + \Gamma_P}{2} \right) \left(\frac{\phi_E - \phi_P}{\delta x_e} \right) A - \left(\frac{\Gamma_E + \Gamma_P}{2} \right) \left(\frac{\phi_E - \phi_P}{\delta x_e} \right) A + S_u + S_P \phi_P \quad (3.11)$$

La diferencia entre la forma de discretizar los términos convectivos y difusivos se debe a que el proceso de afecta a la distribución de las cantidades transportadas a lo largo de sus gradientes en todas las direcciones, mientras que la convección ejerce su influencia solamente en la dirección del flujo. Debido a ello, para flujos altamente convectivos es poco adecuado utilizar un esquema de diferencias centrales como el anterior. En esta investigación se ha empleado un esquema alternativo, conocido como *Upwind* de segundo orden. El cual se explicará a continuación, empezando por el de primer orden, y ampliando al de segundo orden.

Esquema *Upwind*

Como ya se ha comentado, el mayor inconveniente que presenta el esquema de las diferencias centrales es que su incapacidad para identificar la dirección del flujo, por lo que el valor de la propiedad ϕ en la cara oeste de la celda, estará siempre influenciado por ϕ_P y ϕ_W . Cosa que invalida la utilización de este método en el caso de flujos altamente convectivos, donde la cara w de la celda debería de recibir una influencia mayor de nodo W que del nodo P. El esquema *Upwind* tiene en cuenta este hecho a la hora de determinar el valor de ϕ en la cara de la celda: el valor convectivo de ϕ en una cara se toma igual al valor del nodo aguas arriba.

Cuando el flujo recorre el dominio de oeste a este, la velocidad u es positiva en ambas caras, luego $F_W > 0$ y $F_e > 0$, por lo que los valores de ϕ en las caras serán: $\phi_w = \phi_W$ y $\phi_e = \phi_P$, y la ecuación de balance (3.2) discretizada quedará:

$$F_e \phi_P - F_W \phi_W = D_e (\phi_E - \phi_P) - D_w (\phi_P - \phi_W) + (S_u + S_P \phi_P) \quad (3.12)$$

Cuando el flujo va en sentido contrario (de este a oeste), $F_W < 0$ y $F_e < 0$, lo que provoca que $\phi_w = \phi_P$ y $\phi_e = \phi_E$, quedando el balance (3.2) discretizado de la forma:

$$F_e \phi_E - F_W \phi_P = D_e (\phi_E - \phi_P) - D_w (\phi_P - \phi_W) + (S_u + S_P \phi_P) \quad (3.13)$$

Estas ecuaciones se pueden unificar en una sola, que sirva para ambas direcciones del flujo:

$$a_P \phi_P = a_E \phi_E + a_W \phi_W + S_u \quad (3.14)$$

donde las definiciones de los nuevos coeficientes son:

$$a_P = a_W + a_E + (F_e - F_W) - S_P \quad (3.15)$$

$$a_W = D_w + \max(F_W, 0) \quad (3.16)$$

$$a_E = D_e + \max(-F_e, 0) \quad (3.17)$$

Cuando se selecciona un esquema *Upwind* de segundo orden, el valor de la variable dependiente en una cara ϕ_f se obtiene mediante la expresión:

$$\phi_f = \phi + grad\phi \cdot \Delta s \quad (3.18)$$

ahora la aproximación no es lineal, sino que es de segundo orden, siendo ϕ el valor de la variable dependiente en el centro de la celda, $grad\phi$ su gradiente aguas arriba de la celda y Δs el vector desplazamiento desde el celda que hay aguas arriba y el centro de la cara. El gradiente de cada celda se calcula de la siguiente manera:

$$grad\phi = \frac{1}{V} \sum_f^N \overline{\phi_f} n A \quad (3.19)$$

donde los valores en las caras de $\overline{\phi_f}$ se computan promediando ϕ de las celdas adyacentes a la cara.

Fluent dispone de un esquema de discretización de tercer orden llamado *Quick*, detallado en Versteeg-Malalasekera (2007). La razón de no aplicar este esquema de tercer orden a nuestro modelo numérico es porque los resultados no presentan diferencias significativas respecto al esquema *Upwind*, además de que la discretización de tercer orden supone un mayor coste computacional, y en algunos casos presentaba problemas de convergencia.

Toda la teoría anteriormente desarrollada para flujo unidireccional es extrapolable al flujo tridimensional.

3.3.3. Linealización de las ecuaciones discretizadas y resolución

Una vez discretizadas las ecuaciones que modelizan el problema, el siguiente paso consiste en linealizar dichas ecuaciones para cada nodo, y resolver el sistema de ecuaciones algebraicas resultante mediante un método numérico. Un detalle a destacar, que antes se ha comentado brevemente, es que en el desarrollo anterior se ha supuesto que el campo de velocidades era conocido, cuando en general no se conoce, y hay que obtenerlo como parte de la solución general (junto con otras variables del flujo).

Los principales problemas que surgen a la hora de resolver las ecuaciones discretizadas de cada nodo son dos: por un lado la existencia de términos no lineales de la forma ρu^2 , por otro lado el cálculo de la variable presión. Se busca hallar el valor de la presión, y de las tres componentes de la velocidad en cada celda, para lograr tal fin se dispone de la ecuación de la conservación de la masa (una ecuación escalar), y la ecuación de la conservación de la cantidad de movimiento (una ecuación vectorial, desglosable en tres ecuaciones vectoriales), luego se tiene el mismo número de ecuaciones que incógnitas. El problema surge por el acoplamiento entre las dos ecuaciones anteriores a través de la presión, ya que la presión no interviene en la ecuación de la conservación de la masa, la cual sólo depende de la velocidad. En este caso, al considerarse flujo incomprensible, la densidad y la presión no están asociadas.

Los dos problemas de no linealidad y acoplamiento entre ecuaciones se resuelven mediante el algoritmo *Simple* (*Semi-implicit Method for Pressure-Linked Equations*), propuesto por Patankar y Spalding en 1972. La forma de operar del algoritmo *Simple* es suponer el campo de presiones, lo cual permite hallar las tres componentes de la velocidad a partir de la ecuación de la conservación de la cantidad de movimiento. Calculado el campo de velocidades, se obtiene, a partir de la ecuación de la conservación de la masa, una corrección para la presión, la cual será nuevamente introducida en la ecuación de la conservación de la cantidad de movimiento, a partir de la cual se volverá a obtener un nuevo campo de velocidades. El proceso anterior se repetirá hasta que se alcance la convergencia. El algoritmo *Simple* se explicará más adelante, antes se describirá como se resuelve el problema que surge al tomar la presión entre nodos alternados (debido a la discretización), mediante una malla alternada.

El modo de discretización antes descrito, aplicado a la ecuación de la conservación de la cantidad de movimiento, genera campos de presión alternados, ya que la diferencia de presión se toma entre dos puntos alternados. Lo que hace este método es tomar este campo de presión alternado (no real) como un campo de presión uniforme a la hora de usarlo en la ecuación de la cantidad de movimiento. Algo similar ocurre al realizar la discretización de la ecuación de continuidad, que debido al método de discretización exige la igualdad de velocidades entre dos puntos alternados, pero no entre dos adyacentes. Por lo que se obtiene un campo de velocidad alternado que no puede aceptarse como real.

La solución a los problemas comentados en el párrafo anterior es utilizar una malla alternada, donde las componentes de la velocidad se calculan para los puntos que se sitúan sobre las caras de los volúmenes de control. Es decir, la componente x de la velocidad se calcula en las caras que son normales a la dirección x . La malla alternada permite calcular el flujo de masa a través de las caras de los volúmenes de control sin ninguna interpolación para la componente de velocidad. No aparecerá un campo de velocidades alternado, debido a que la ecuación de continuidad contendrá términos que expresarán diferencias de velocidades adyacentes. Otra ventaja del empleo de una malla alternada es que la diferencia de presión entre dos puntos adyacentes constituirá la fuerza natural que provoca la aparición de las componentes de velocidad ente dichos puntos adyacentes. Por tanto, los campos de presión no serán tratados como uniformes, por lo que no aparecerán como posibles soluciones.

De esta forma se evalúan las variables escalares (presión, densidad, temperatura, etc.) en los nodos ordinarios (malla original), pero las componentes de la velocidad son calculadas en una nueva malla (malla alternada) cuyas celdas están centradas en las caras de la malla original.

El algoritmo *Simple* es, tal y como se ha comentado antes, un método de resolución, basado en un procedimiento de suposición-corrección, cuyo fin es hallar el campo de presiones en una malla alternada. A continuación se explica el procedimiento para un flujo bidimensional en coordenadas cartesianas.

La forma discretizada de la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento para la componente u de la velocidad puede ponerse de la siguiente manera:

$$a_e u_e = \Sigma a_{ady} u_{ady} + b + (p_P - p_E) A_E \quad (3.20)$$

donde el subíndice e indica el punto que define el volumen de control considerado, el subíndice ady define los correspondientes puntos adyacentes, el coeficiente a_{ady} cuantifica el efecto combinado de la convección y la difusión en las caras del volumen de control, el término b engloba los términos fuente, excepto el correspondiente al gradiente de presión, representado por medio del último término $(p_P - p_E) A_E$ (siendo A_E el área sobre el que actúa el gradiente). Para la v de la velocidad es:

$$a_n v_n = \Sigma a_{ady} v_{ady} + b + (p_P - p_N) A_N \quad (3.21)$$

Como se ha explicado al introducir el algoritmo *Simple*, la velocidad sólo puede resolverse a partir del campo de presiones, el cual no se conoce. Para resolver las expresiones anteriores se supondrá una presión p^* , que se introducirá en las ecuaciones, para obtener de ellas las componentes de velocidad u^* y v^* :

$$a_e u_e^* = \Sigma a_{ady} u_{ady}^* + b + (p_P^* - p_E^*) A_e \quad (3.22)$$

$$a_n v_n^* = \Sigma a_{ady} v_{ady}^* + b + (p_P^* - p_N^*) A_n \quad (3.23)$$

Los valores u^* y v^* obtenidos deberán satisfacer la ecuación de continuidad, si no es así, se actualizará el valor de la presión, para nuevamente hallar una nueva velocidad mediante las ecuaciones (3.22) y (3.23). La distribución correcta de presiones se pone como:

$$p = p^* + p' \quad (3.24)$$

donde p' es la corrección de la presión p . De igual forma se expresarán las componentes de la velocidad:

$$u = u^* + u' \quad (3.25)$$

$$v = v^* + v' \quad (3.26)$$

Restando (3.20) de (3.22) se llega a:

$$a_e u_e' = \Sigma a_{ady} u_{ady}' + (p_P' - p_E') A_e \quad (3.27)$$

Se hace una aproximación, despreciando el término sumatorio (más adelante se explicará porque se puede despreciar este término):

$$u_e' = (p_P' - p_E') d_e \quad (3.28)$$

donde $d_e = A_e / e_e$, a partir de (3.28), con (3.25) queda:

$$u_e = u_e^* + (p'_P - p'_E)d_e \quad (3.29)$$

Procediendo igual para la dirección y:

$$v_n = v_n^* + (p'_P - p'_N)d_N \quad (3.30)$$

Ahora se explicará cómo se convierte la ecuación de continuidad en una ecuación para la corrección de la presión. Para el problema que se trata (estacionario) la ecuación de la continuidad es:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (3.31)$$

Ecuación que ha integrarse sobre el volumen de control mostrado en la Fig. 6. Utilizando las componentes de velocidad obtenidas mediante las formulas de corrección (3.29) y (3.30), se llega a la ecuación discretizada para p' :

$$a_P p'_P = a_N p'_N + a_S p'_S + a_E p'_E + a_W p'_W + b' \quad (3.32)$$

donde:

$$a_P = a_N + a_S + a_E + a_W \quad (3.33)$$

$$a_N = \rho_n d_n A \quad (3.34)$$

$$a_S = \rho_s d_s A \quad (3.35)$$

$$a_E = \rho_e d_e A \quad (3.36)$$

$$a_W = \rho_w d_w A \quad (3.37)$$

$$b' = (\rho u^* A)_w - (\rho u^* A)_e + (\rho u^* A)_s - (\rho u^* A)_n \quad (3.38)$$

La ecuación (3.32) representa una expresión para la corrección de la presión, obtenida a partir de la ecuación de la continuidad. El término fuente b' es un término de ajuste que proviene del campo de velocidades de hallado a partir de las ecuaciones discretizadas de la conservación de la cantidad de movimiento (u^* y v^*). Resolviendo la ecuación (3.32), se obtiene la corrección del campo de presiones p' en todos los puntos. Lo cual permitirá hallar el campo de presiones correcto a través de (3.24) y el de velocidad a través de (3.29) y (3.30). La omisión de los términos $\sum a_{ady} u'_{ady}$ no afecta a la solución final, ya que las correcciones para la presión y la velocidad han de ser cero para la solución convergida.

Para evitar que la ecuación de la corrección diverja, se emplean coeficientes de relajación en el proceso iterativo, de manera que:

$$p = p^* + a_p p' \quad (3.39)$$

Donde a_p es el factor de relajación para la presión.

Fluent dispone de otros algoritmos como el *Simplex* o el *Piso* para tratar el acoplamiento presión-velocidad. Algoritmos que suelen proporcionar una convergencia más rápida, pero con mayor número de operaciones a realizar. En los casos contrastados con los diferentes algoritmos no se han apreciado diferencias significativas ni en la solución obtenida, ni en los tiempos de cálculo.

Algoritmo de cálculo de las ecuaciones (TDMA)

El último paso para obtener los resultados de nuestro modelo numérico es obtener la solución del sistema de ecuaciones lineales obtenido mediante lo explicado anteriormente. Los métodos de resolución de sistemas de ecuaciones lineales se clasifican en dos grupos: métodos directos (regla de Cramer o eliminación Gaussiana entre otros), y método indirectos o iterativos.

Los métodos iterativos se basan en la aplicación repetitiva de un algoritmo que conduzca a la convergencia después de un número de repeticiones. Algunos ejemplos de algoritmos iterativos son el método de Jacobi y el de Gauss-Seidel. Los métodos iterativos no son capaces de predecir de antemano el número de operaciones para alcanzar la solución, algo que si es posible predecir en los métodos directos. La ventaja de los métodos iterativos es que sólo los coeficientes distintos de cero de las ecuaciones necesitan ser almacenados en la memoria. El problema de este tipo de métodos es que alcanzan la convergencia muy lentamente, sobre todo en grandes sistemas de ecuaciones. Por este motivo no se consideran muy útiles para *CFD*.

El código *Fluent* utiliza para la resolución una técnica conocida como *TDMA* (*Tridiagonal matrix algorithm*), desarrollada por Llewellyn Thomas (1949). Este método es una forma simplificada del método de eliminación de Gauss, capaz de resolver sistemas de ecuaciones tridiagonales (todos los coeficientes son cero, excepto los de la diagonal principal, y las dos diagonales adyacentes a ésta). La principal ventaja de este método es el uso reducido de la memoria de computación. El desarrollo del método puede encontrarse, con todo tipo de detalle en Versteeg-Malalasekera (2007).

3.4. Condiciones de contorno

En esta sección se presentarán las condiciones de contorno que tendrá nuestro modelo. Las condiciones de contorno finalmente seleccionadas son el resultado de la evolución del modelo numérico inicial de Mónica Hernández (2009), posteriormente desarrollado en los Proyectos Fin de Carrera de R. Otón "*Modelo numérico de la capa límite atmosférica en entornos urbanos de grandes dimensiones*" y de A.J. Consuegro "*Modelización numérica y validación experimental de la deposición de gotas de agua de una torre de refrigeración de tiro mecánico en un entorno urbano*". En 2012, A.J. Consuegro en su Trabajo Fin de Periodo Formativo de Doctorado "Estudio de homogeneidad de la capa límite atmosférica y su aplicación a la modelización numérica del arrastre y deposición de gotas de agua procedentes de una torre de refrigeración de tiro forzado", resolvió algunos problemas de falta de homogeneidad en la capa límite térmica, así como en la viscosa. En el presente Proyecto Fin de

Carrera, se ha utilizado la información obtenida en la bibliografía nombrada, teniendo únicamente que realizar pequeñas modificaciones para conseguir la homogeneidad horizontal de la capa viscosa.

Esta sección está dividida en dos apartados, por un lado las condiciones de contorno en la fase continua, y por otro las condiciones de contorno para simular la fase discreta. Las condiciones de contorno a introducir en el modelo numérico son las siguientes:

- I. Para la fase continua.
 - a) Dirección del viento.
 - b) Perfil vertical de velocidad a la entrada, así como la velocidad del flujo adyacente a la superficie superior del dominio (techo).
 - c) Perfil vertical de temperatura a la entrada, además de los valores de temperatura en el techo y el suelo del dominio.
 - d) Humedad específica del aire húmedo en la entrada del dominio.
 - e) Energía cinética turbulenta a la entrada del dominio.
 - f) Perfil vertical de disipación turbulenta a la entrada del dominio.
 - g) Condiciones del aire húmedo expulsado por la torre de refrigeración: velocidad, temperatura y humedad.
- II. Para la fase discreta.
 - a) Gasto másico de la inyección.
 - b) Distribución de tamaños de las gotas (parámetros de la distribución Rosin-Rammler: diámetro máximo, mínimo y medio, parámetro de dispersión).
 - c) Temperatura de las gotas de agua expulsadas por la torre de refrigeración.

3.4.1. Condiciones de contorno en la fase continua

Como ya se comentó, la fase continua está formada por el aire seco más el agua, formando la mezcla de aire húmedo que se ve en la realidad. Son distintas variables las que se deben de fijar para resolver nuestro problema: tres variables obtenidas directamente mediante las medidas experimentales: velocidad, temperatura y humedad; y otras dos variables derivadas de las anteriores: energía cinética turbulenta y disipación turbulenta. Para obtener las variables anteriormente mencionadas se parte de los datos experimentales tomados por el grupo de Investigación de la Universidad Miguel Hernández de Elche, así como las ecuaciones matemáticas que

cumplen los perfiles verticales de velocidad, temperatura y disipación turbulenta, que serán explicadas en este apartado.

El grupo de Investigación de la Universidad Miguel Hernández cuenta con una estación meteorológica situada junto a la salida de la torre de refrigeración piloto, esta estación meteorológica toma medidas de velocidad, temperatura y humedad a una altura de 10.56 m.

Velocidad, energía cinética turbulenta y disipación turbulenta

En el modelo numérico a desarrollar, la elección de la velocidad a usar como condición de contorno, es uno de las fases más críticas, ya que tanto la magnitud de la velocidad como su dirección determinarán en gran medida los resultados de deposición y VMD del caso simulado.

Uno de los mayores problemas que surgen al intentar fijar la velocidad y dirección del aire atmosférico en un modelo estacionario, es la aleatoriedad del viento, que dificulta tanto su medición, como la posterior elección de la dirección y velocidad para simular el caso.

Al ser un modelo numérico estacionario (que no depende del tiempo) sólo se seleccionará para la entrada una única dirección del viento y un único valor de velocidad para cada altura, pero en la realidad el viento va variando tanto en dirección como en magnitud a cada altura, lo que provocará un pequeño error para los casos en que el viento sea muy fluctuante.

A través de la estación meteorológica se adquiere la dirección y velocidad instantánea del viento, a una altura de 10.56 m. El ensayo que se realiza para la toma de datos consiste en tomar medidas de velocidad y dirección del viento de forma continua en un intervalo de tiempo de 30 minutos.

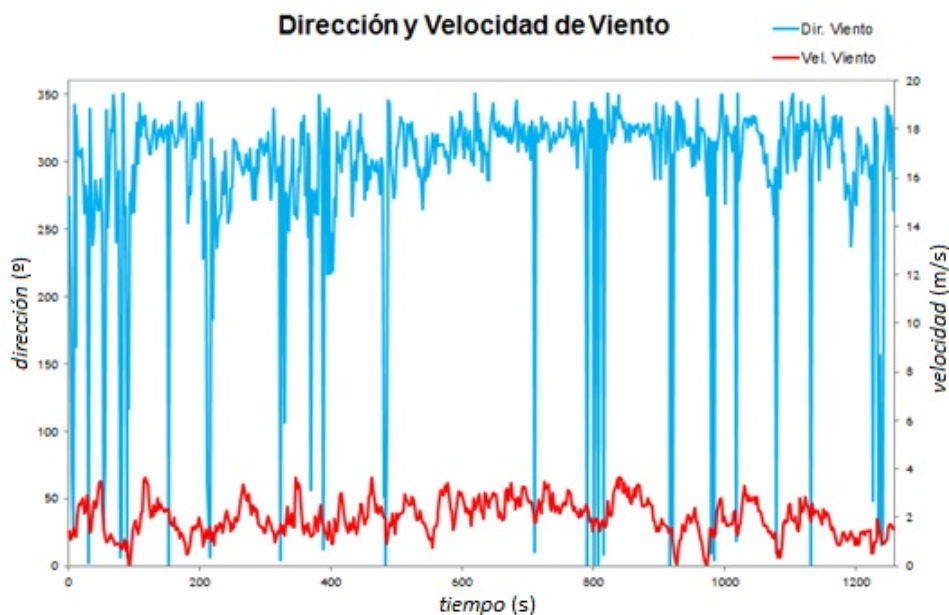


Fig. 7. Medidas de dirección y velocidad del viento a partir de la estación meteorológica para el caso 02/10/12.

Una vez obtenidos los datos, se llega a uno de los puntos más delicado del modelo numérico: seleccionar una dirección y una velocidad de entre todas las medidas, para usarlas como condición de contorno en la simulación. La selección se hará mediante un método de filtrado.

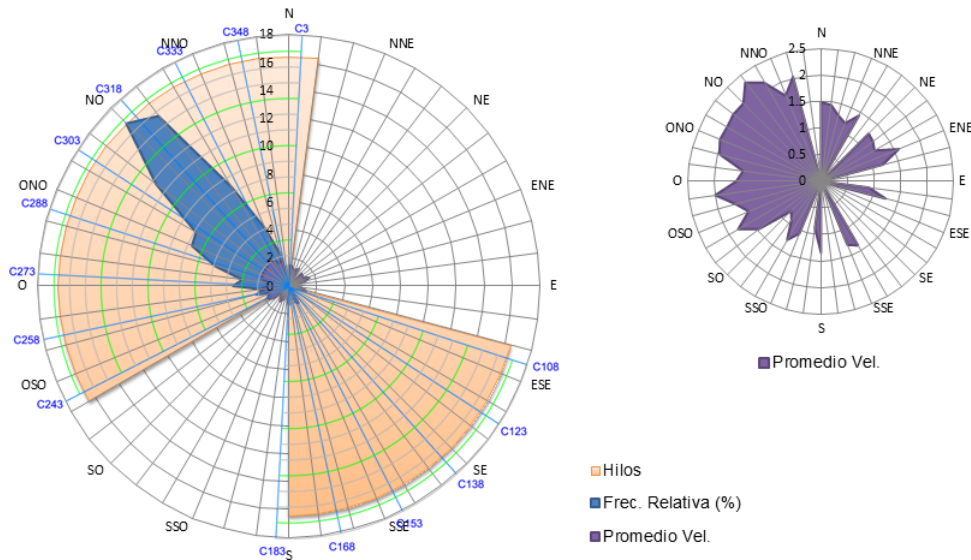


Fig. 8. Mapas de frecuencia relativa de la dirección y la velocidad del viento para el caso 02/10/12.

Lo primero que se debe de hacer es separar los datos según su dirección, cada conjunto de datos (rango) abarca 10°, así que queda un rango de datos de 0 a 10°, otro de 10° a 20°, y así sucesivamente.

El siguiente paso consiste en descartar los datos de datos que tengan menos de 25 muestras, ya que se considera que esos rangos descartados han sido sólo debido a ligeras fluctuaciones, pero que el viento no ha soplado suficientemente en esa dirección durante el ensayo.

Por último se obtiene la media tanto de velocidad como de dirección entre los datos de los rangos que pasaron la criba. Obteniendo así la dirección que se debe de girar nuestra malla interior (ver sección 2.1), y la velocidad del viento a una altura de 10.56 m.

Para obtener el perfil vertical de velocidad de nuestro problema, que relacione la velocidad con la altura, se usará el modelo desarrollado por Otón, R.A. (2010) y posteriormente por Consuegro, A.J. (2010) en sus proyectos fin de carrera, ambos basados en el trabajo de Richards y Hoxey (1993) sobre la simulación numérica de la ABL. Este modelo se resume en el cumplimiento de las siguientes tres condiciones:

- Los perfiles verticales de las magnitudes fluidas que se introducen como entrada deben ser coherentes con el modelo de turbulencia empleado y con las condiciones de rugosidad del terreno:

$$U(z) = \frac{u_{ABL}^*}{\kappa} \ln \left(\frac{z + z_0}{z_0} \right) \quad (3.40)$$

$$k = \frac{u_{ABL}^{*2}}{\sqrt{C_\mu}} \quad (3.41)$$

$$\varepsilon(z) = \frac{u_{ABL}^{*3}}{\kappa \cdot (z + z_0)} \quad (3.42)$$

- La rugosidad geométrica del suelo, k_s , debe de ser menor a la altura del nodo central de la primera celda junto a este, z_p :

$$k_s \leq z_p \quad (3.43)$$

- Los valores de velocidad, energía cinética turbulenta y disipación turbulenta deben estar fijados en la zona superior del dominio.

Con este sistema de ecuaciones ya se tiene totalmente definido el problema. Es importante recordar que nuestro modelo de turbulencia es un modelo $\kappa - \varepsilon$. La energía cinética turbulenta k no depende de la altura, a diferencia de la disipación turbulenta ε .

El parámetro z_0 es la rugosidad aerodinámica del terreno. El profesor del Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos de la Universidad Politécnica de Cartagena, y codirector del presente Proyecto, Blas Zamora Parra, se encargó de hallar el valor del parámetro z_0 en el entorno de nuestra torre de refrigeración piloto del Campus de la Universidad Miguel Hernández de Elche. El desarrollo de la obtención del parámetro se puede ver en el proyecto fin de carrera de Consuegro, A.J. (2010), obteniendo un valor de $z_0 = 0.5$ m.

El valor de C_μ es 0.09, según el modelo originalmente creado por Richards y Hoxey.

La constante de von Karman tiene un valor de $\kappa = 0.41$.

La constante u_{ABL}^* representa la velocidad de fricción, que será distinta para cada caso simulado.

A continuación se describe como se obtienen las variables velocidad, energía cinética y disipación turbulenta a partir de la medida experimental de velocidad a una altura determinada.

Viendo la ecuación (3.40) se deduce que sólo es necesario conocer el valor de la velocidad a una altura determinada, ya que conocemos el valor de z_0 y de κ , lo cual permitirá despejar el valor de la única constante desconocida u_{ABL}^* . El valor de la velocidad a una altura determinada es el valor de velocidad obtenido a una altura de $z = 10.56$ m por medio de la estación meteorológica. A partir los valores de κ , z_0 y la velocidad a 10.56 m se despeja el valor de u_{ABL}^* de la ecuación (3.40), obteniendo el perfil de velocidad completo en función de la altura. A continuación, de la ecuación (3.41) se despeja el valor de la energía cinética turbulenta k , ya que se conoce u_{ABL}^* y

C_μ . Por último se obtiene el perfil vertical de disipación turbulenta ε a partir de la ecuación (3.42), ya que los valores de u_{ABL}^* , z_0 y κ son conocidos.

En octubre de 2012 se instaló una torre de medición meteorológica en el Campus de Universidad Miguel Hernández de Elche, a 30 metros del edificio donde se encuentra la torre de refrigeración piloto. La torre de medición meteorológica cuenta con tres veletas, tres anemómetros, tres termómetros y tres higrómetros, por lo que es capaz de tomar medidas de velocidad del viento, dirección del viento, temperatura y humedad relativa a tres alturas diferentes (15 m, 25 m y 40 m), y recogerlas mediante un data-logger. La torre también dispone de un barómetro para medir la presión a una altura de 10 m.



Fig. 9. Torre de medición meteorológica instalada en el Campus UMH de Elche.

Esta torre de medición meteorológica abre un abanico de posibilidades para el proyecto. Por un lado podrá servir para obtener perfiles verticales de temperatura y velocidad de la atmósfera, que podrán ser usados como condiciones de contorno en las simulaciones, o para validar los perfiles obtenidos mediante las medidas de la estación meteorológica. Estos perfiles obtenidos a partir de la torre serían más completos que los obtenidos con un único punto, ya que los obtenidos a partir de la torre meteorológica se obtendrían a partir de dos o tres medidas tomadas a alturas diferentes. Por otro lado, las medidas tomadas en la torre meteorológica podrán servir como datos experimentales de validación para los valores de velocidad y temperatura obtenidos a partir del modelo numérico, pudiendo realizar así una validación más completa de las capas límite viscosa y térmica, y analizar más profundamente la influencia de los edificios en dichas capas.

A continuación se detalla la metodología para sacar el perfil vertical de velocidad en el caso de utilizar las medidas obtenidos a partir de la torre de medición meteorológica, se dispone de los datos de velocidad a tres alturas diferentes (15, 25 y 40 m). El primer paso a realizar es sacar la velocidad media para cada una de las tres alturas, el método aplicado para tal fin consiste en un simple promedio de los datos obtenidos a lo largo del tiempo, para comprobar que el valor medio obtenido es representativo, se realiza un test de normalidad de Kolmogorov-Smirnoff. La forma de

hallar el perfil de velocidades es ligeramente distinta a la usada anteriormente (a partir de la estación meteorológica), ya que ahora se dispone de 3 velocidades distintas a 3 alturas distintas: de la ecuación (3.40) se despejan los valores de u_{ABL}^* y z_0 , a partir de los datos de velocidad a 25 y 40 m (se tendrá un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas, ya que ahora no se supone z_0 conocido). El dato de velocidad a la altura de 15 m se utiliza para estudiar la influencia de los edificios en el perfil teórico obtenido a partir de dos puntos, ya que por ser el más bajo debería de ser el más afectado por la presencia de edificios: se despejan nuevamente las constantes u_{ABL}^* y z_0 de la ecuación (3.40), pero no igual que antes a partir del sistema de dos ecuaciones y dos incógnitas, sino utilizando una correlación mediante los tres datos de velocidad a tres alturas diferentes. Una vez obtenido el perfil de velocidad por ambos métodos (a partir de 2 puntos y a partir de 3 puntos) se comparan ambos perfiles, con el fin de analizar la influencia de los edificios sobre el perfil de velocidad.

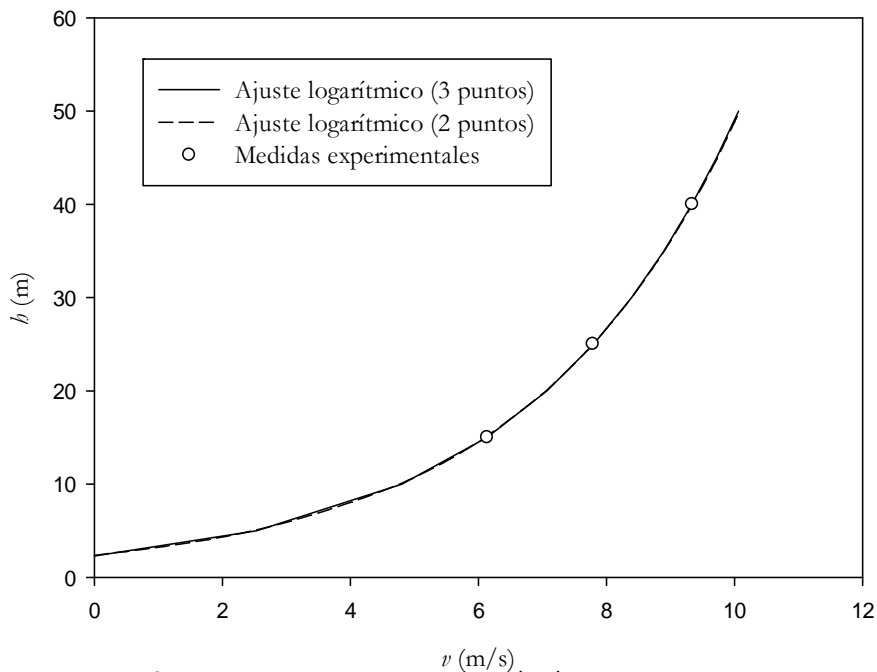


Fig. 10. Perfil vertical de velocidad del día 11/01/13, obtenido a partir de 2 y 3 puntos. No se aprecian diferencias entre ambos perfiles. FUENTE: Blas Zamora.

Resumiendo lo anterior, la diferencia fundamental entre obtener el perfil de velocidades mediante las medidas de la estación o las medidas de la torre, es que con la estación meteorológica el valor de z_0 es 0.5 m (rugosidad obtenida por Blas Zamora Parra para el terreno del caso a estudiar), mientras que si se utilizan los datos de la torre de medición meteorológica, la rugosidad z_0 se despeja de la ecuación (3.40) al obligar al perfil de velocidades a que pase por los dos puntos obtenidos experimentalmente, disponiendo además de una tercera medida para validar el perfil.

La segunda limitación se puede resolver jugando con la ecuación que relaciona la constante de rugosidad C_s , con la rugosidad aerodinámica del terreno z_0 y la rugosidad geométrica del suelo k_s :

$$k_s = \frac{9.793 \cdot z_0}{C_s} \quad (3.44)$$

Con esta ecuación se podría cumplir el requerimiento (4.4) independientemente del valor de la altura de la primera celda adyacente al suelo, ya que permite elegir libremente el valor de la rugosidad geométrica k_s , eso sí, modificando el valor de la constante de rugosidad C_s . Para hacer esto en el código *Fluent* es necesario utilizar una UDF para introducir el valor de la rugosidad geométrica del suelo, que es $k_s = 3.933$ m, ya que el elemento más bajo de nuestra malla tiene una altura de 2.49 m, por lo que su C_s sería 1.245 m.

La superficie superior del dominio se modelizará como una pared móvil, que avanzará en la dirección de entrada de la fase continua, con la velocidad correspondiente a una altura de 400 m (sacada del perfil de velocidades).

Las paredes del dominio serán modelizadas como superficies de simetría, el suelo quedará como pared fija, debiendo de introducir los parámetros de rugosidad k_s y C_s explicados anteriormente sólo en la zona exterior, pues el suelo interior contiene los volúmenes que modelizan los edificios, que le dan la rugosidad al terreno.

Un problema que venía arrastrando el modelo numérico era la deformación del perfil de velocidades en las proximidades a la superficie de salida del dominio. Este problema era debido a la condición de contorno que había en esa superficie. Si la condición de contorno es *pressure outlet*, el perfil se deforma, decelerándose en la parte inferior y acelerándose en la parte superior. Si la condición de contorno a la salida es *outflow* el perfil también se deforma anómalamente, sólo que esta vez acelerándose en la parte superior y frenándose en la inferior. Ambos defectos tienen su origen en la ecuación de continuidad, que provoca que para que la masa que ha entrado sea la misma que sale, si el flujo se frena en la parte inferior debido a la rugosidad del suelo, se acelerará en la superior, y viceversa.

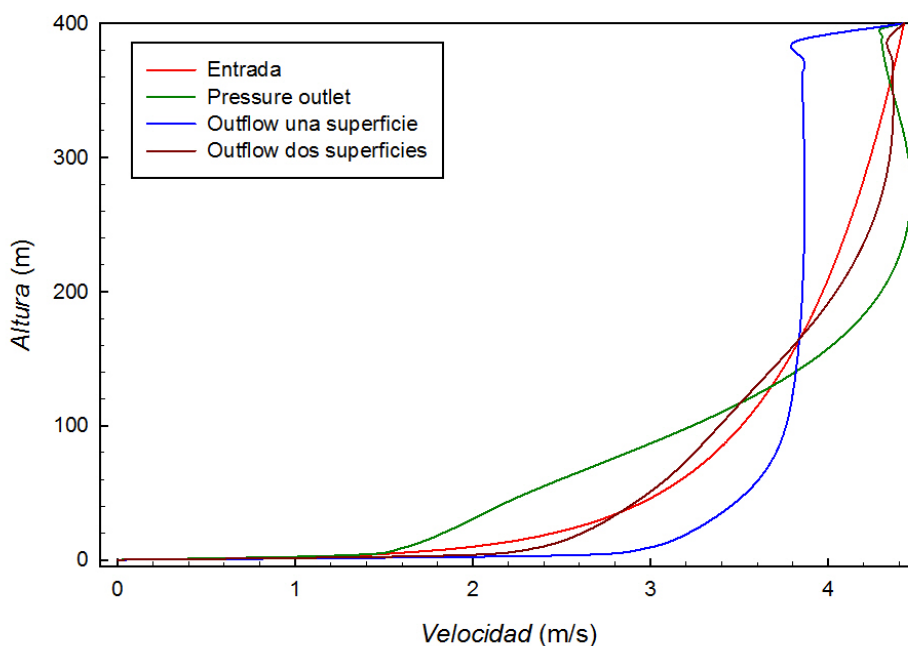


Gráfico 1. Perfiles de velocidad en la salida del dominio del caso 02/10/12, cada uno con distinta condición de contorno asignada.

La solución a este problema es dividir la superficie de salida en dos superficies, una inferior que va desde 0 hasta 60 m y otra superior desde los 60 a los 400 m. La condición de salida será *outflow*, pero definiendo la fracción del gasto másico que sale por cada una de las superficies. Para hallar la fracción del gasto másico sólo se debe de integrar el perfil de velocidades (4.1) entre 0 y 60 m (superficie inferior), y entre 60 y 400 m (superficie superior). No se incluye la densidad en el cálculo de la integral por ser constante en toda la atmósfera. La suma de ambas integrales será el total, y para hallar la fracción sólo hay que dividir la integral superior o inferior entre el total. No es necesario integrar la velocidad por todo el ancho del dominio, ya que el perfil de velocidades sólo depende de la coordenada z y no de la coordenada y . La integral es la siguiente:

$$Q = \int_{z_1}^{z_2} U(z) \cdot dz = \int_{z_1}^{z_2} \frac{u_{ABL}^*}{\kappa} \ln \left(\frac{z + z_0}{z_0} \right) \cdot dz = \frac{u_{ABL}^*}{\kappa} \int_{z_1}^{z_2} \ln \left(\frac{z + z_0}{z_0} \right) \cdot dz$$

$$= \frac{u_{ABL}^*}{\kappa} \cdot \left[(z + z_0) \cdot \left(\ln \left(\frac{z + z_0}{z_0} \right) - 1 \right) \right]_{z_1}^{z_2} \quad (3.45)$$

- Para la superficie inferior $z_1 = 0$ y $z_2 = 60$; luego $Q_i = \frac{u_{ABL}^*}{\kappa} \cdot 230.14$
- Para la superficie superior $z_1 = 60$ y $z_2 = 400$; luego $Q_s = \frac{u_{ABL}^*}{\kappa} \cdot 2047.55$

Lo que da las siguientes fracciones másicas:

- Por la superficie inferior saldrá el 10.1 % del gasto másico de entrada.
- Por la superficie superior saldrá el 89.9 % del gasto másico de entrada.

Estas fracciones másicas son las mismas para todos los casos, ya que no dependen de las constantes que hay en la ecuación (4.1).

Temperatura y humedad

Para obtener los perfiles verticales de humedad y temperatura se parte de las medidas tomadas en la estación meteorológica, se dispone de los datos de humedad y temperatura a la altura de 10.56 m. La adquisición de datos consiste en tomar temperaturas y humedades relativas durante 30 minutos, y posteriormente obtener el promedio de las medidas obtenidas.

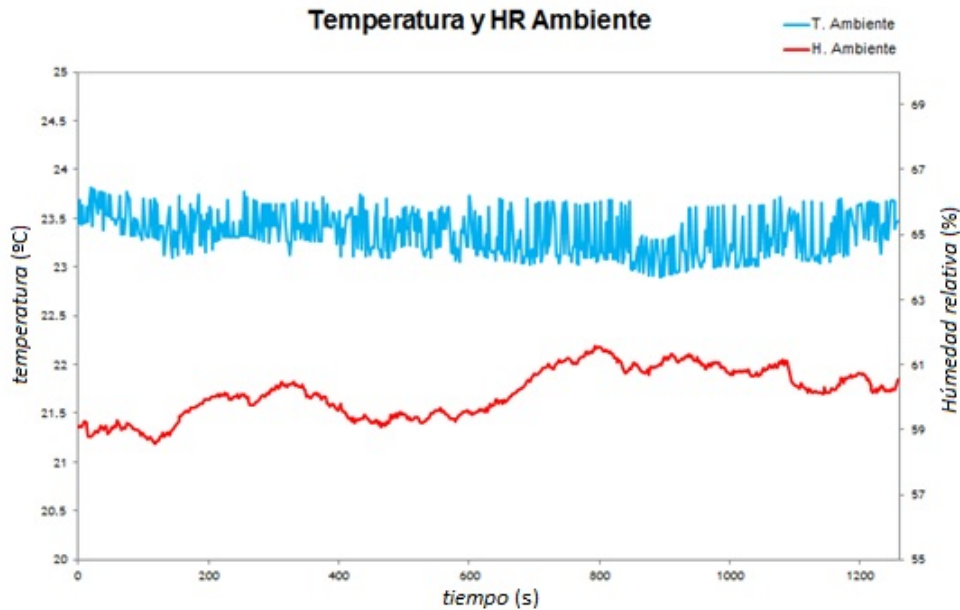


Fig. 11. Medidas de temperatura y humedad relativa del aire a partir de la estación meteorológica para el caso 02/10/12.

Pero la dificultad está en obtener el perfil completo de temperatura a partir de un único dato de temperatura a una altura de 10.56 m. Para solucionar este problema la Universidad Miguel Hernández de Elche elaboró unos perfiles verticales de temperatura a partir del tratamiento estadístico de mediciones de temperatura desde el suelo hasta una altura de 24 000 metros, realizadas por el Centro Meteorológico Territorial de Murcia, mediante el lanzamiento de dos globos sonda diarios durante un año.

La correlación obtenida fue la siguiente:

$$T(z) = 3.99351915427538 \cdot 10^{-9} \cdot z^3 + 0.0000156853359819905 \cdot z^2 - 0.0224824689256011 \cdot z + 299.9081063 \quad (3.46)$$

donde la temperatura se obtiene en °C, por lo que debemos de sumarle 273.15 °C para pasarlo a grados kelvin (K).

Para hallar nuestro perfil vertical de temperatura se modifica la ordenada en el origen de la ecuación anterior (3.46), de manera que a una altura de 10.56 m se tenga la temperatura promedio obtenida a partir de las medidas de la estación meteorológica. Dicho de otra manera, se obliga al perfil a pasar por el punto experimental variando únicamente el término constante de la ecuación (3.46).

Una forma alternativa a la anterior para obtener el perfil vertical de temperaturas es mediante los datos tomados por la torre de medición meteorológica, la cual dispone de tres termómetros, capaces de adquirir temperaturas en tres alturas diferentes. Para tal fin se dispondría de los datos de temperatura a tres alturas diferentes (15, 25 y 40 m). El primer paso nuevamente consiste en obtener el promedio de temperatura para cada una de las tres alturas. Una vez obtenido el promedio de temperatura se realizará regresión lineal para poner la temperatura en función de la altura de la forma:

$$T(z) = a + b \cdot z \quad (3.47)$$

También se podría poner la correlación en función del tiempo, pero el modelo numérico desarrollado es estacionario, por lo que se debería de ignorar el término temporal.

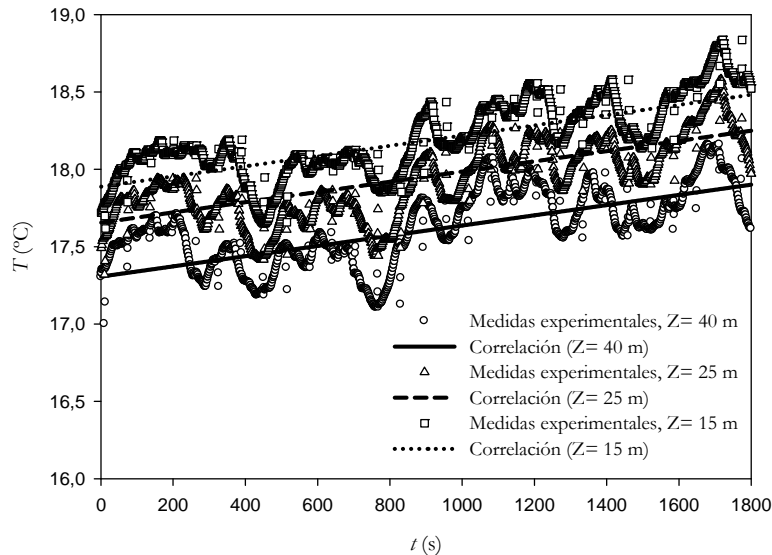


Fig. 12. Medidas de temperatura a partir de la torre de medición meteorológica para el caso 22/10/12.

Resumiendo lo anterior, la diferencia fundamental entre obtener el perfil vertical de temperaturas a partir de la estación o de la torre meteorológica es la siguiente: si se usa la estación, el perfil consiste en un polinomio de tercer grado obtenido a partir de un estudio estadístico del perfil de temperatura diario obtenido por el Centro Meteorológico territorial de Murcia, en dicho polinomio sólo se modificará el término independiente, obligando al perfil a contener la medida experimental. Si se utiliza la torre de medición meteorológica, se realiza una regresión lineal a partir de los tres datos de temperatura obtenidos.

En el suelo del dominio se impondrá como condición de contorno la temperatura que corresponda a una altura de 0 m en el perfil vertical de temperatura empleado. La superficie superior tendrá la temperatura correspondiente a 400 m según en perfil. Las superficies laterales continuarán siendo superficies de simetría.

En cuanto a la humedad específica, finalmente quedará constante en toda la superficie de entrada, y tendrá el valor obtenido a partir de la humedad relativa tomada en la estación meteorológica (se conoce presión, temperatura y humedad relativa). El modelo numérico original incluía un perfil en el que la humedad variaba en función de la altura, pero al avanzar por el dominio humedad se homogeneizaba, por lo que al final se optó por dejarla constante, independiente de la altura. Los datos de humedad relativa obtenidos mediante la torre de medición meteorológica corroboran lo anterior, ya que no muestran diferencias significativas entre los valores de humedad a diferentes alturas. Aún así, es posible obtener, mediante una correlación de tres puntos, un perfil lineal de la humedad relativa en función de la altura a partir de las

medidas de humedad relativa obtenidas mediante la torre de medición meteorológica, tal y como se hace con la temperatura.

Al igual que ocurría con la velocidad, las medidas y perfiles de temperatura y humedad relativa obtenidos a partir de la torre de medición meteorológica pueden usarse como condiciones de contorno, pero también pueden usarse como datos para la validación del modelo numérico, comparando los resultados del modelo numérico en dichos puntos con las medidas experimentales obtenidas a partir de la torre.

Antes de terminar de definir las condiciones de contorno en la capa límite térmica, es importante comentar la influencia que tiene sobre ella el ratio de viscosidad turbulenta (relación entre la viscosidad turbulenta y laminar). Uno de los mayores problemas que presentaba la capa límite térmica era la falta de homogeneidad horizontal, así como la deformación del perfil de temperaturas, que en ocasiones llegaba a hacerse uniforme (misma temperatura a diferentes alturas). A.J. Consuegro (2012) estudió la influencia que el ratio de viscosidad turbulenta tenía sobre la capa límite térmica y viscosa, llegando a la conclusión de que se debía de limitar el ratio de viscosidad turbulenta a $1 \cdot 10^6$, ya que ese límite daba los mejores resultados tanto para la capa límite térmica como viscosa, consiguiendo en ambas la homogeneidad horizontal. En realidad, para la capa límite térmica, el máximo ratio de $1 \cdot 10^5$ ya daba buenos resultados en la capa límite, manteniendo invariante el perfil de temperaturas, y consiguiendo la mencionada homogeneidad horizontal, pero este límite de ratio de viscosidad turbulenta producía anomalías de la capa límite térmica. Por lo que se limitará el ratio de viscosidad turbulenta a $1 \cdot 10^6$.

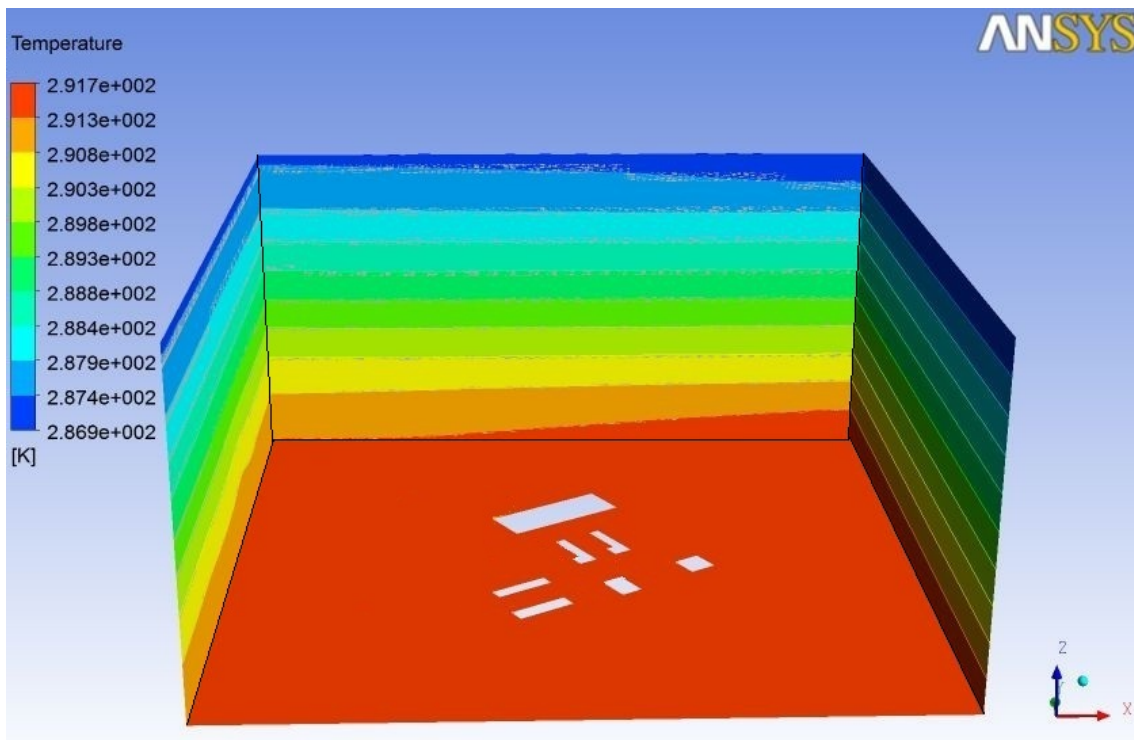


Fig. 13. Capa límite térmica para el caso 02/10/12. Se aprecia la homogeneidad horizontal de la temperatura.

3.4.2. Condiciones de contorno en fase discreta

La fase discreta se modeliza mediante una inyección de gotas de agua, las cuales son expulsadas verticalmente de la torre de refrigeración. La información que se debe de tener en cuenta para la lanzar la simulación es:

- Velocidad y temperatura con que salen las gotas.
- El gasto másico de agua que sale de la torre de refrigeración.
- Distribución de las gotas, es decir: cuántas gotas hay de cada diámetro.

Para obtener toda la información anterior, el grupo de Investigación de la UMH de Elche realiza un ensayo de arrastre en la torre de refrigeración piloto.

El objetivo del ensayo de arrastre es medir todas las variables anteriores (velocidad, temperatura, gasto másico y distribución de tamaños) de las gotas que salen de la torre de refrigeración piloto durante su funcionamiento normal. Para simular el funcionamiento normal de una torre de refrigeración se usa un ventilador, el cual expulsa una mezcla de aire y gotas de agua por la salida de la torre. Para introducir las gotas de agua se dispone de dos sistemas de distribución: por gravedad y por presión. Por gravedad consiste en una tubería abierta que va rebosando y dejar caer el agua al rellano; por presión consiste en una boquilla que pulveriza las gotas. En el ensayo se mide directamente la velocidad y temperatura de las gotas (además de la humedad específica del aire), así como el gasto másico de agua introducido.

Pero la dificultad llega a la hora de hallar la distribución de tamaños de las gotas, es decir, cuantas gotas hay de cada tamaño. Para hallar la distribución se utilizan nueve papeles hidrosensibles, los cuales se colocan a la salida de la torre de refrigeración, tal y como indica la imagen inferior.

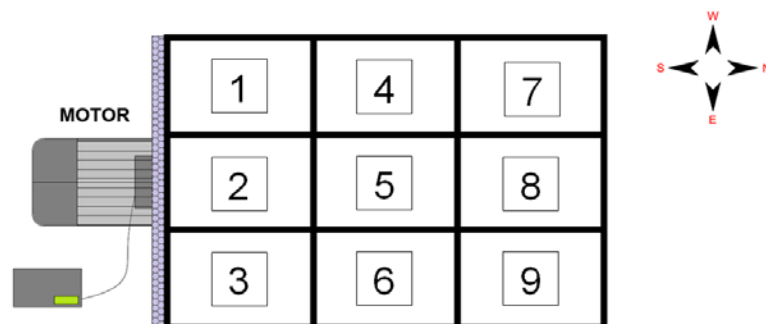


Fig. 14. Distribución de los papeles hidrosensibles para realizar el ensayo de arrastre.

Cada gota al caer sobre el papel hidrosensible lo impregna, produciéndole una mancha, mancha que tendrá mayor o menor área en el papel según sea el volumen de la gota. Tras el ensayo los papeles son llevados a un software informático desarrollado por los investigadores de la Universidad Miguel Hernández de Elche. El software es capaz de captar mediante fotografía digital cuantos píxeles ocupa cada gota, pudiendo extrapolar ese dato para sacar el volumen de la gota.

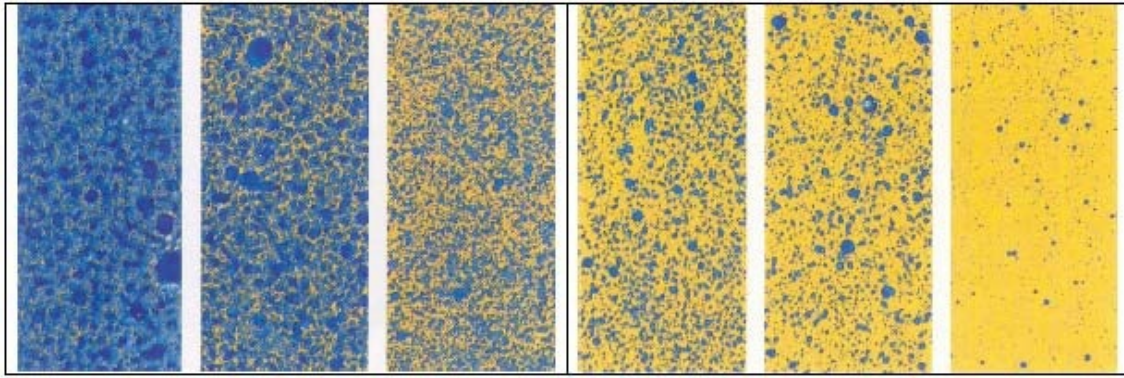


Fig. 15. Manchas que dejan las gotas en los papeles hidrosensibles tras el ensayo de arrastre.

Al volumen total obtenido han de aplicársele tres factores de corrección:

- Factor de corrección que tenga en cuenta la deformación de la gota al chocar con el papel.
- Factor de corrección que tenga en cuenta la relación entre el área de la sección de salida de la torre de refrigeración y la sección cubierta por los papeles hidrosensibles.
- Factor de corrección de Stokes, que tiene en cuenta la cantidad de gotas que en un principio chocarían contra el papel, pero que son desviadas por el flujo de aire que las rodea. Cuando mayor es la gota, mayor es su masa, y por tanto es más difícil que sea desviada por efectos inerciales. Por lo que este factor de corrección depende del tamaño de la gota.

El ensayo de arrastre se realiza durante unos segundos, y después se promedian los resultados obtenidos con el fin de obtener los parámetros necesarios para definir totalmente la fase discreta en el modelo numérico.

Tras varios ensayos de arrastre, se observó que la distribución de las gotas se asemejaba a una distribución Rosin-Rammler, que cumple la ecuación:

$$Y_d = e^{-\left(\frac{d}{\bar{d}}\right)^n} \quad (3.47)$$

Donde Y_d representa la fracción másica de gotas con un diámetro mayor que d .

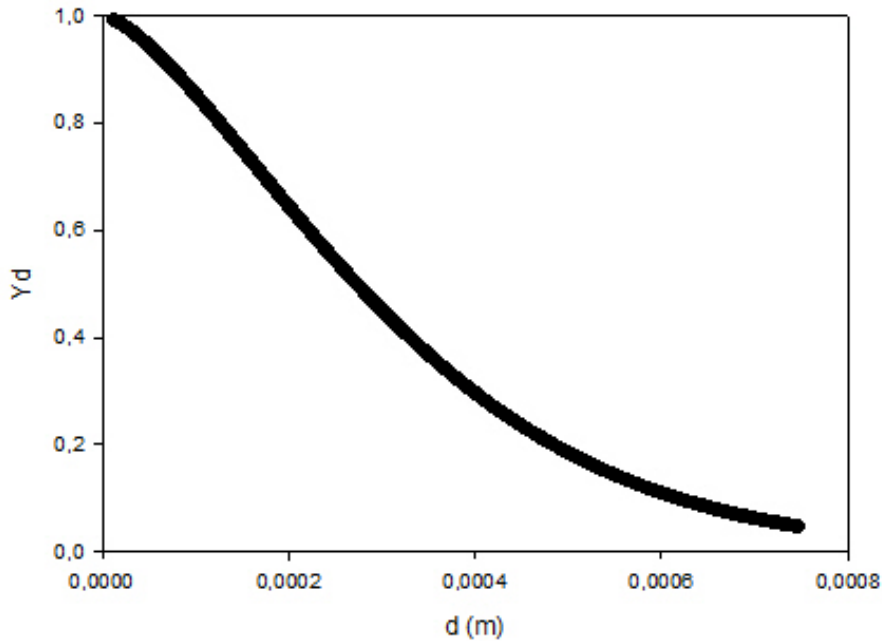


Fig. 16. Forma típica de una distribución Rosin-Rammler.

Los parámetros necesarios para definir la dispersión son el parámetro de dispersión n (relacionado con la pendiente de la curva), y \bar{d} , que es el diámetro tal que las gotas menores que él supondrían el 36.79 % de la masa total de la distribución.

Despejando de (3.47) se llega a:

$$\ln(-\ln(Y_d)) = n \cdot \ln(d) - n \cdot \ln(\bar{d}) \quad (3.48)$$

que puede ser interpretado como una recta " $y = a \cdot x + b$ " con:

$$y = \ln(-\ln(Y_d)) \quad (3.49)$$

$$x = \ln(d) \quad (3.50)$$

El siguiente paso es ordenar las gotas según su diámetro, ver que fracción másica corresponde a cada diámetro, y hacer una regresión lineal, que dará los valores de la pendiente a y la ordenada en el origen b .

$$n = a \quad (3.51)$$

$$\bar{d} = e^{-\frac{b}{a}} \quad (3.52)$$

El procesamiento de los papelillos también permite definir el rango de diámetros que hay en la inyección, desde el más pequeño al más grande.

3.5. Estudio del mallado

El objetivo de modificar la malla que ya utilizaba el grupo de investigación del departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos es doble, por un lado actualizar el software con el que se prepara la malla, por otro lado optimizar el tamaño de la malla, reduciendo su número de elementos, pero refinando la malla en las zonas de estudio que nos interesan.

El software utilizado para preparar la malla es *ICEM CFD*, por medio del interfaz gráfico *Meshing* de *ANSYS*. Hasta ahora la malla se preparaba por medio del programa *Gambit*, pero desde hace tiempo este software no se actualizaba y la asistencia técnica iba desapareciendo, por lo que se decidió cambiar a *ICEM*, que bajo la licencia de *ANSYS* se estaba convirtiendo en una herramienta de mallado potente y eficaz.

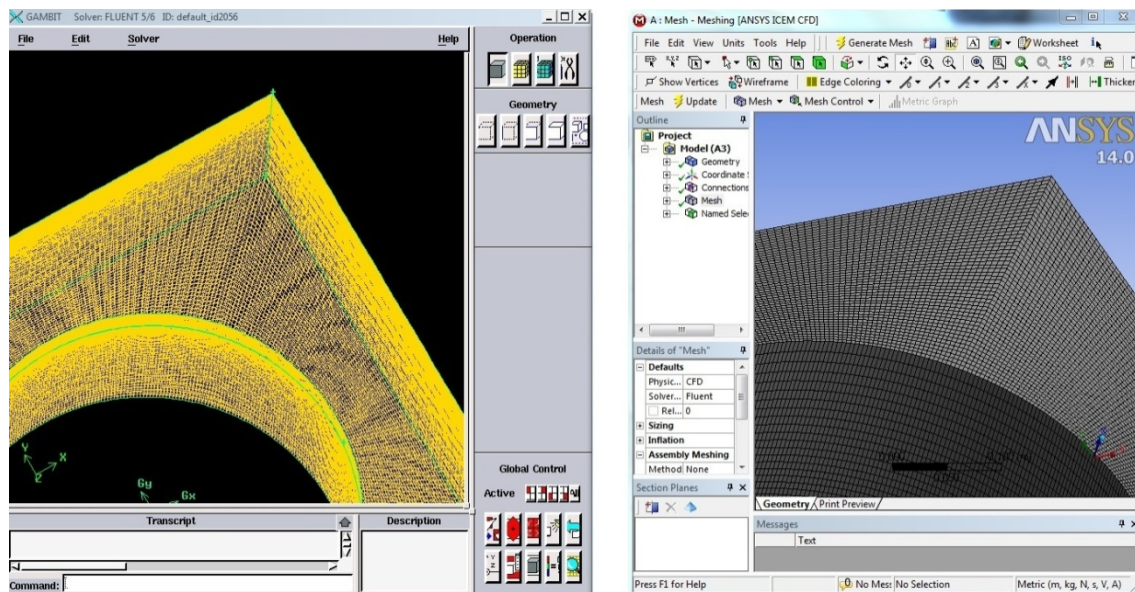


Fig. 17. Comparación del interfaz de los distintos software de mallado. A la izquierda *Gambit*, a la derecha *Meshing*.

Para la optimización del tamaño de la malla se realizarán comparaciones sucesivas hasta conseguir el tamaño de malla óptimo. Se partirá de la malla original utilizada en las simulaciones anteriores, se crearán dos mallas nuevas, una con más elementos que otra, pero ambas con elementos más pequeños que la original; la primera comparación, llamada “comparación base”, consistirá en comparar las tres mallas, eligiendo la más ligera de ellas, pero que no tenga influencia en el resultado. Posteriormente se realizará la comparación “aligeramiento parte superior”, consistente en alargar los elementos de la parte superior de la malla elegida y ver si este alargamiento repercute en los resultados, se aumenta el tamaño de los elementos de la parte superior porque la zona de interés de la malla es la de los edificios, lejana de la zona superior que no es tan importante para la deposición. Por último se realizará la comparación “refinado del entorno del edificio principal”, donde se reducirá el tamaño de los elementos de la zona de interés del dominio, analizando si este refinado produce mejoras sobre la deposición y el VMD.

Se partirá del caso 021012, caso que fue simulado con una malla creada en *Gambit*, la cual tenía 3.4 millones de celdas.

3.5.1. Comparación base

El primer paso es crear dos mallas con más elementos. Como se vio en el apartado 2.2 la geometría a estudiar se divide en dos partes, una interior y otra exterior, pues bien, la malla de la geometría exterior de momento no se modifica, refinando únicamente la parte interior. La razón de partir de una malla con más elementos que la original es asegurar que el tamaño final de la malla elegida no influya en el resultado al simular el caso.

Para la primera etapa de estudio tenemos tres mallas.

- Malla original: Tiene 3.4 millones de elementos. Las celdas de la zona interior tiene una longitud de lado aproximada de 5 m, y tiene 25 elementos en la superficie de salida de la torre de refrigeración.
- Malla A: Con 5 millones de elementos, tiene una longitud de lado en su zona interior de aproximadamente 3 m, cuenta con 64 elementos en la salida de la torre de refrigeración.
- Malla B: Tiene 4.1 millones de elementos, y la longitud de las celdas de su interior son de 4 m. Cuenta con 64 celdas en la salida de la torre de refrigeración.

Los objetivos de esta primera comparación no son más que conseguir una malla base, sobre la cual hacer posteriormente los sucesivos cambios. Una condición esencial es que la malla seleccionada asegure no tener influencia en los resultados (ya que la malla original podría ser demasiado gruesa).

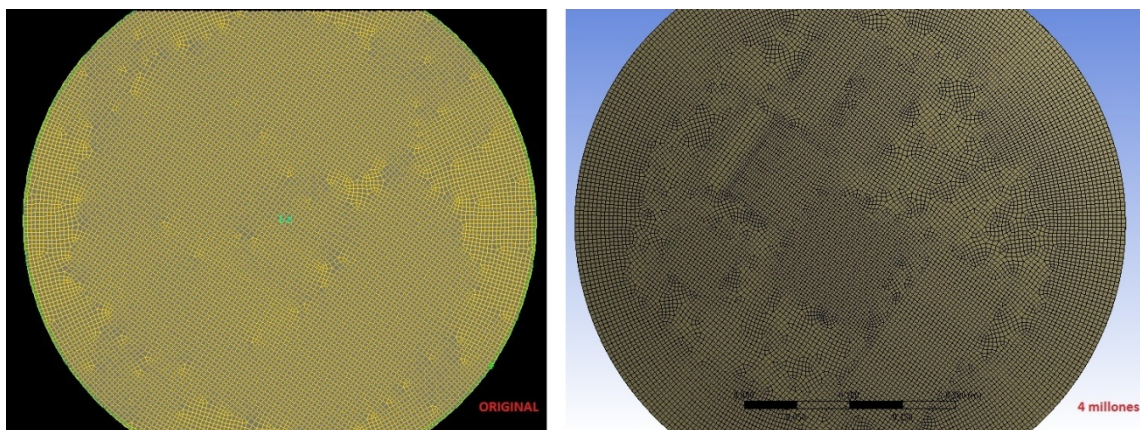


Fig. 18. Imágenes de la malla original (izquierda) y de la malla B (derecha).

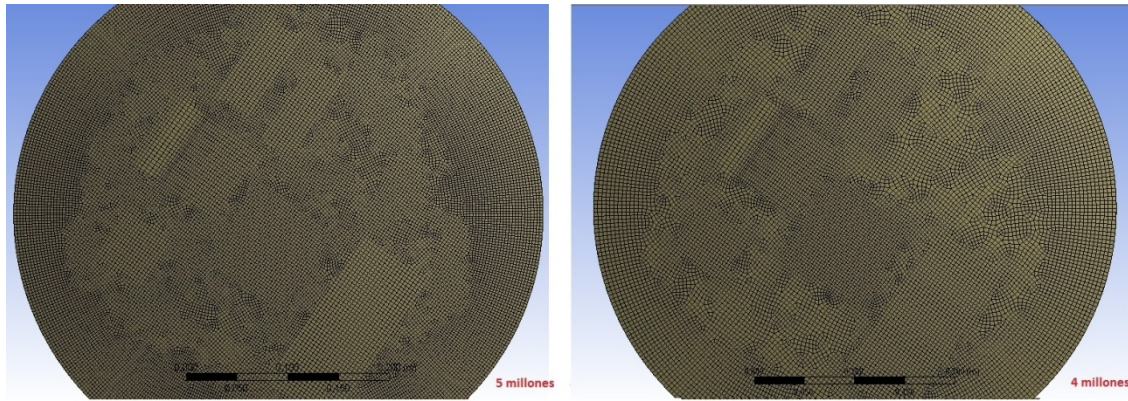


Fig. 19. Imágenes de la malla A (izquierda) y de la malla B (derecha).

La forma de seleccionar la malla es mediante el estudio de la capa límite viscosa y térmica, por medio de la comparación de algunos perfiles singulares de velocidad y temperatura. Para cada malla se seleccionan tres rectas verticales, una en el punto donde está la torre meteorológica (tras el edificio principal), otra recta tras los edificios (para estudiar la influencia de los edificios en el perfil), y una última recta que estará situada en mitad del edificio, pero fuera de la influencia de los edificios. En las gráficas también se incluye el perfil de entrada para ver cómo varia el aire conforme avanza en uno y otro caso.

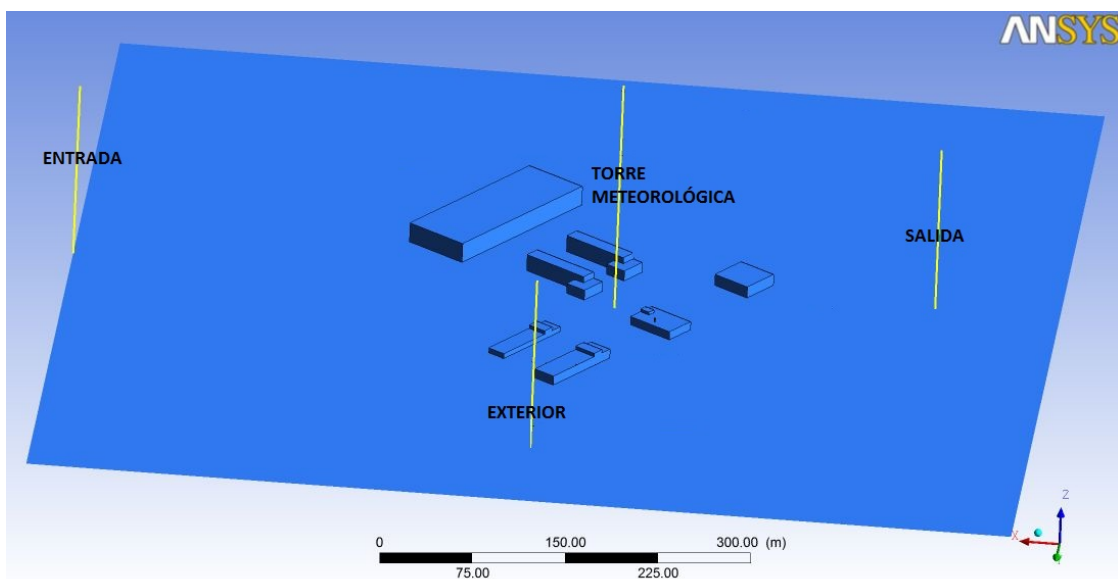


Fig. 20. Detalle de la situación de los perfiles a analizar en el dominio.

Los resultados de la capa límite viscosa para cada uno de los perfiles con cada una de las mallas son los siguientes:

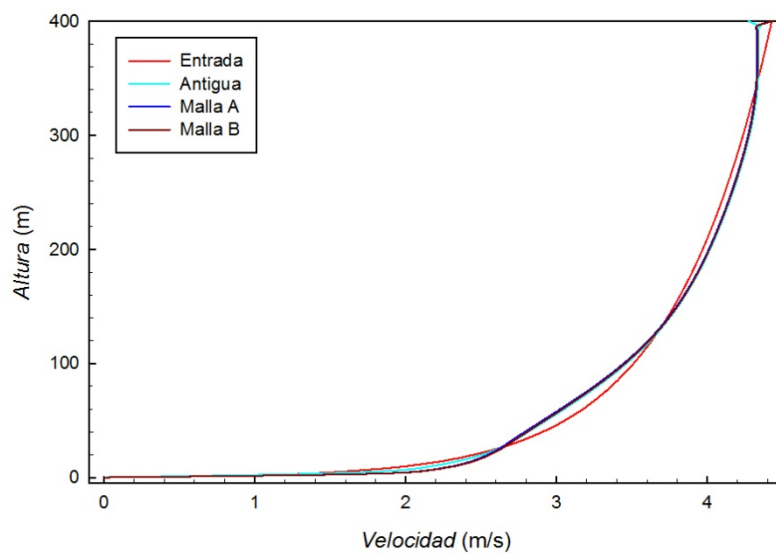


Gráfico 2. Perfiles de velocidad en "exterior" en "comparación base".

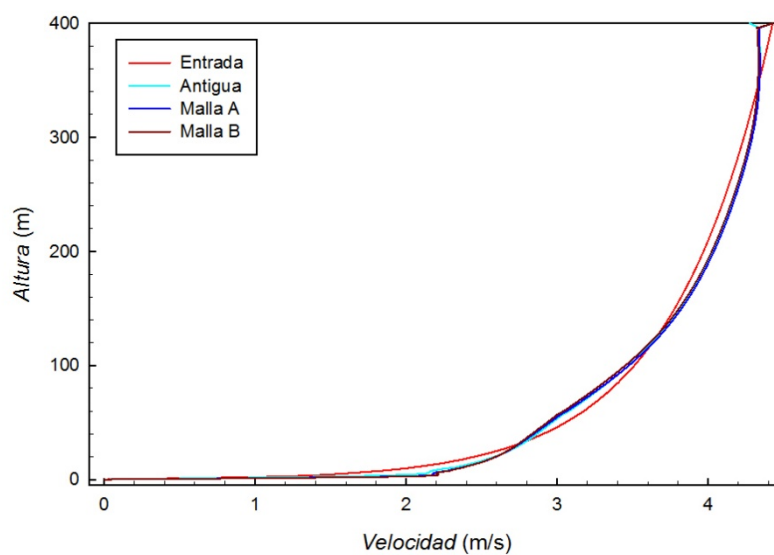


Gráfico 3. Perfiles de velocidad en "Torre meteorológica" en "comparación base".

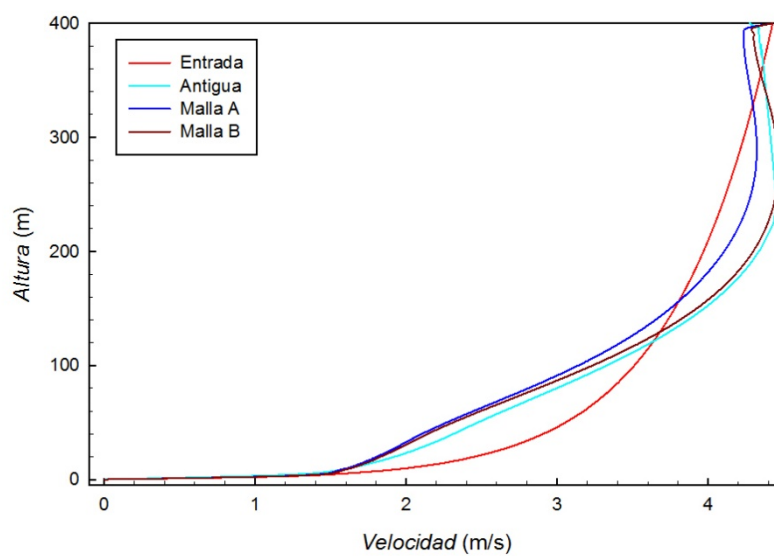


Gráfico 4. Perfiles de velocidad en "salida" en "comparación base".

Se aprecia que las diferencias de los perfiles son insignificantes, excepto en la zona de salida, donde se acentúan las diferencias entre las velocidades en la malla A y las otras dos, pero estas diferencias no llegan a superar los 0.2 m/s, además de que nuestra zona de interés es la de los edificios, donde está la torre meteorológica, en esa zona no hay diferencias significativas entre las velocidades. También destacar que la forma de los perfiles de velocidades en la zona de salida está relacionada con la condición de contorno de la salida, que en esta comparación es *pressure outlet*. En el apartado 3.4 se explicó la influencia de la condición de contorno de la salida en el resultado.

Para la capa límite térmica, los resultados obtenidos son los siguientes:

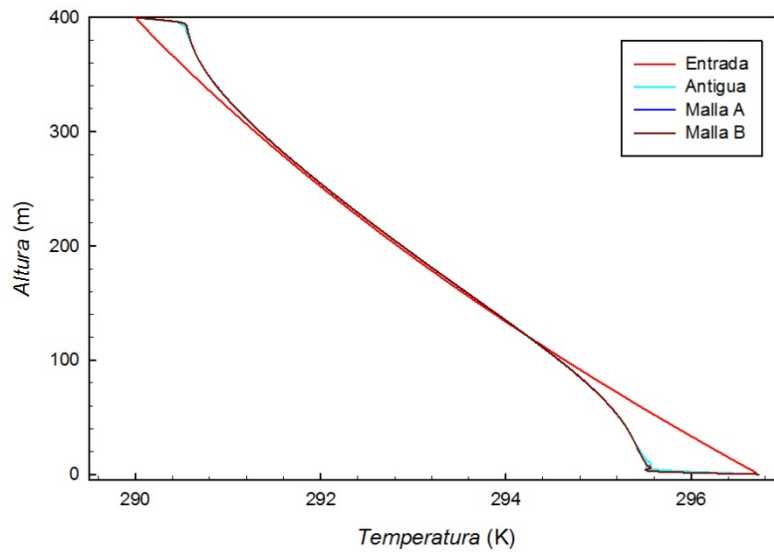


Gráfico 5. Perfiles de temperaturas en "exterior" en "comparación base".

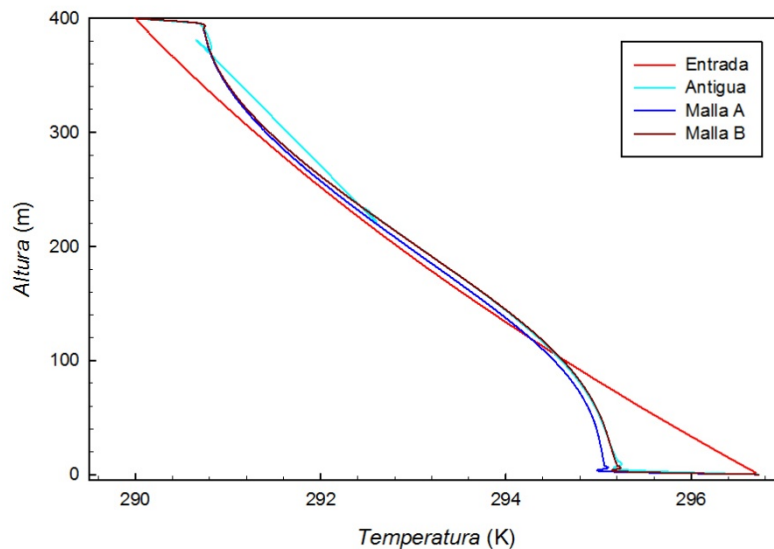


Gráfico 6. Perfiles de temperatura en "Torre meteorológica" en "comparación base".

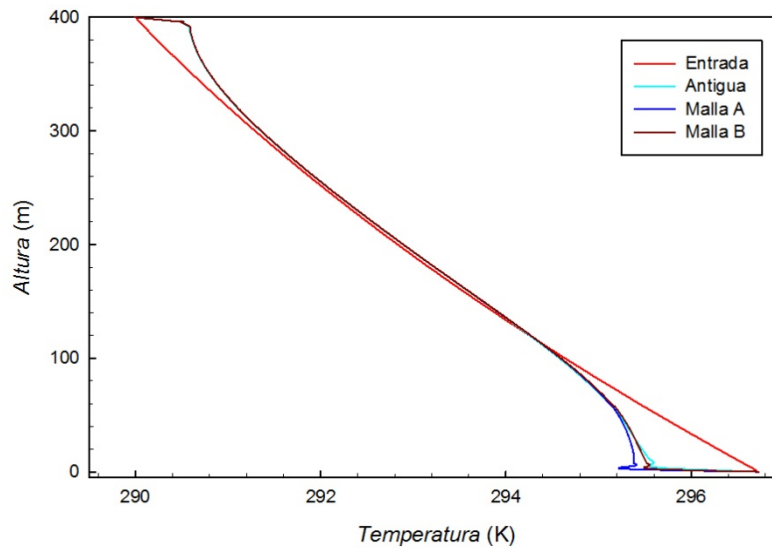


Gráfico 7. Perfiles de temperatura en “salida” en “comparación base”.

En estos perfiles de temperatura se aprecia que la diferencia entre los resultados de temperatura obtenidos mediante las distintas mallas es mínima. Sólo es destacable que en la zona de la torre meteorológica la malla antigua da unas temperaturas ligeramente diferentes a las otras dos.

En base al estudio realizado, se concluye que la malla seleccionada es la malla B (4.1 millones de celdas), ya que da los mismos resultados que la malla A (5 millones de celdas), pero con menos elementos.

3.5.2. Comparación aligeramiento parte superior

Ahora se pasa a otra comparación, se trata de reducir las alturas, tanto de la geometría exterior, como de la interior. La zona de interés de nuestro problema se encuentra entre el suelo y los 30 m de altura, por lo que se tratará de alargar paulatinamente los elementos de la parte superior de la malla (lejos de la zona de interés), reduciendo enormemente el número de elementos, se estudiará cómo influye esto en la velocidad y la temperatura.

Se introduce una nueva malla en el estudio, llamada malla C, que tiene 2.8 millones de elementos, con sólo 74 alturas, ya que sus celdas más altas tienen una altura de 12 m, frente a los 4 m de altura que teníamos en la malla B, que tenía 108 alturas.

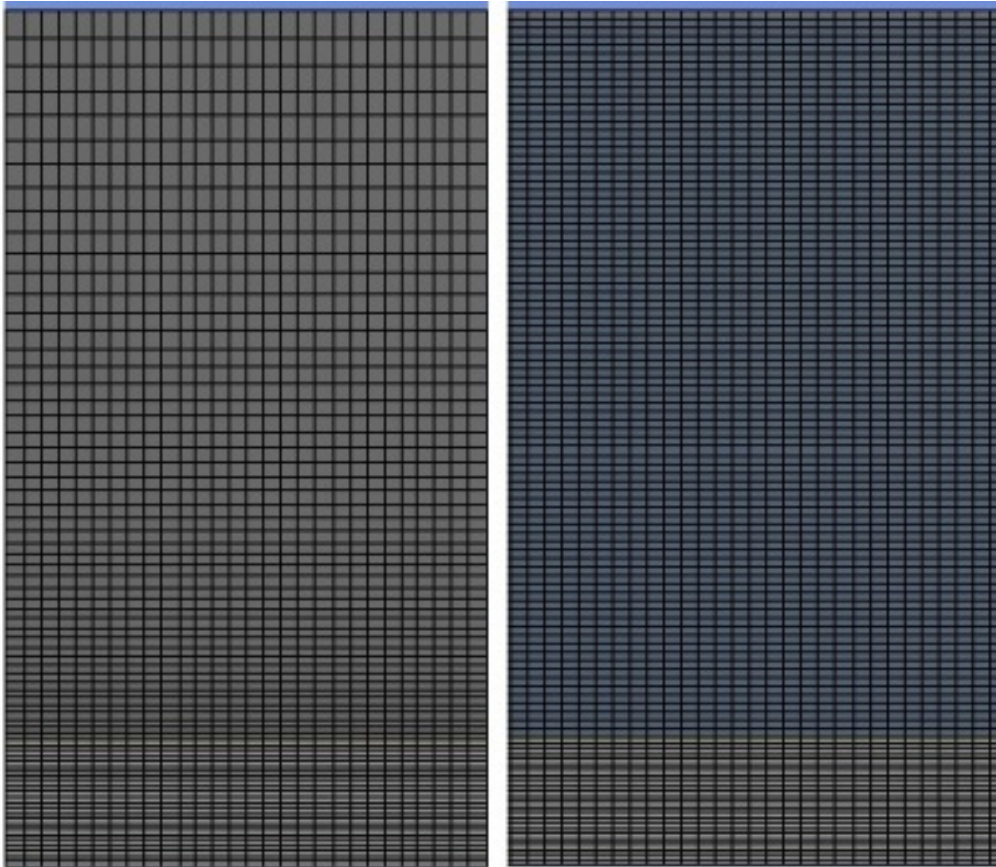


Fig. 21. Detalle de la diferencia entre la altura de los elementos de malla B (derecha) y malla C (izquierda).

Para el estudio, se usarán nuevamente las comparaciones de los perfiles de velocidad y temperatura en los mismos puntos que los usados en la comparación anterior.

Para la capa límite viscosa:

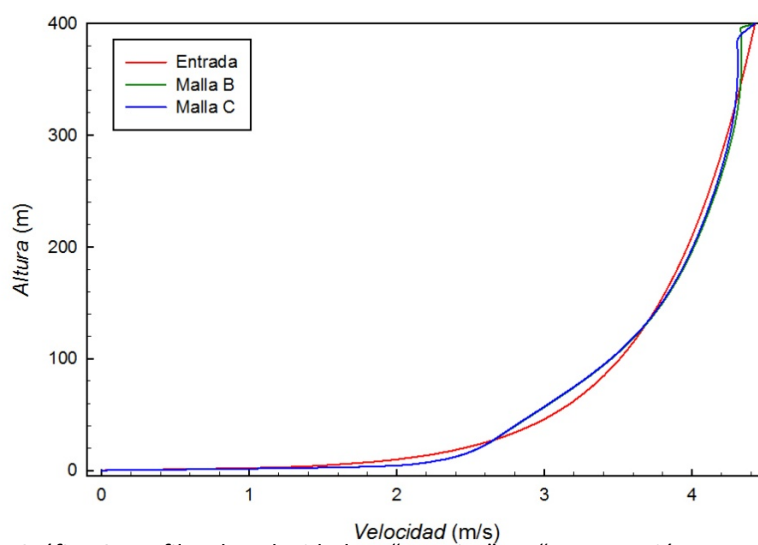


Gráfico 8. Perfiles de velocidad en "exterior" en "comparación alargamiento parte superior".

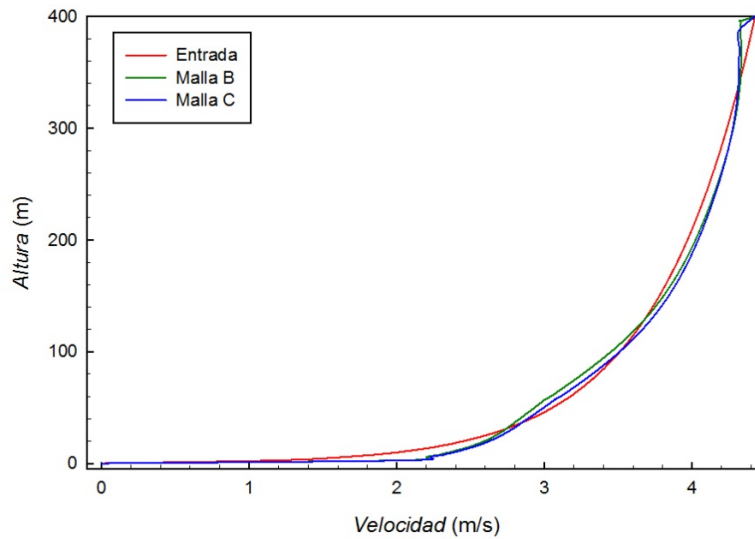


Gráfico 9. Perfiles de velocidad en "Torre meteorológica" en "comparación alargamiento parte superior".

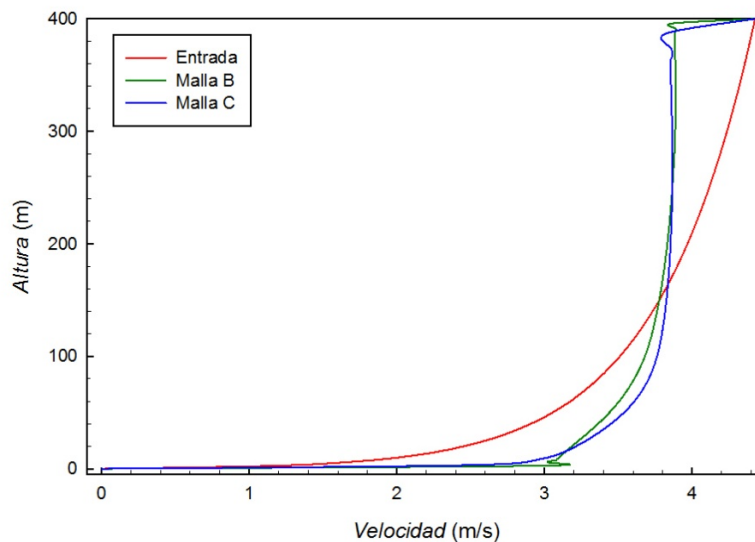


Gráfico 10. Perfiles de velocidad en "salida" en "comparación alargamiento parte superior".

Claramente se observa que la velocidad es idéntica en ambos casos, especialmente para el perfil exterior y para el de la torre meteorológica. Después de los edificios (en la zona de salida) el perfil sufre en ambos casos un aumento de velocidad para bajas alturas, y una disminución de la velocidad en la parte más alta, esto es debido a que se ha realizado la simulación con la condición de contorno en la salida *outflow*, pero con sólo una superficie de salida, explicada en la sección 3.4. Aún así, se observa que las diferencias entre los casos simulados con ambas mallas son casi inexistentes.

Los resultados para la capa límite térmica son los siguientes:

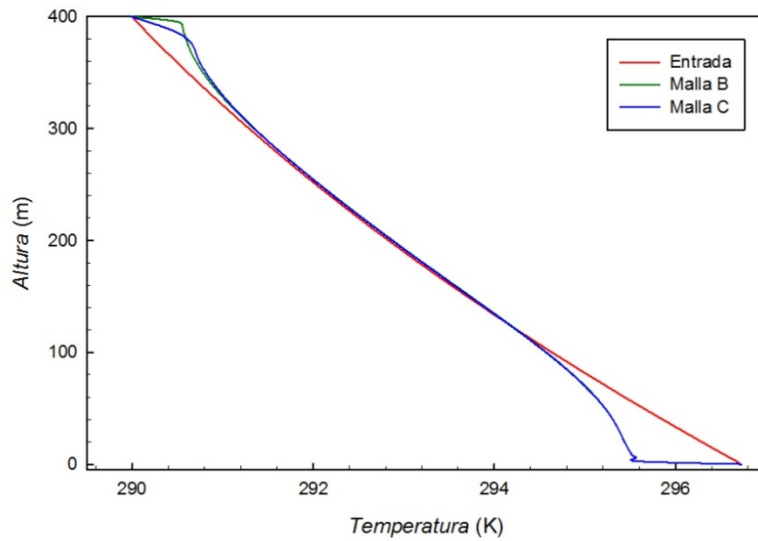


Gráfico 11. Perfiles de temperatura en "exterior" en "comparación alargamiento parte superior".

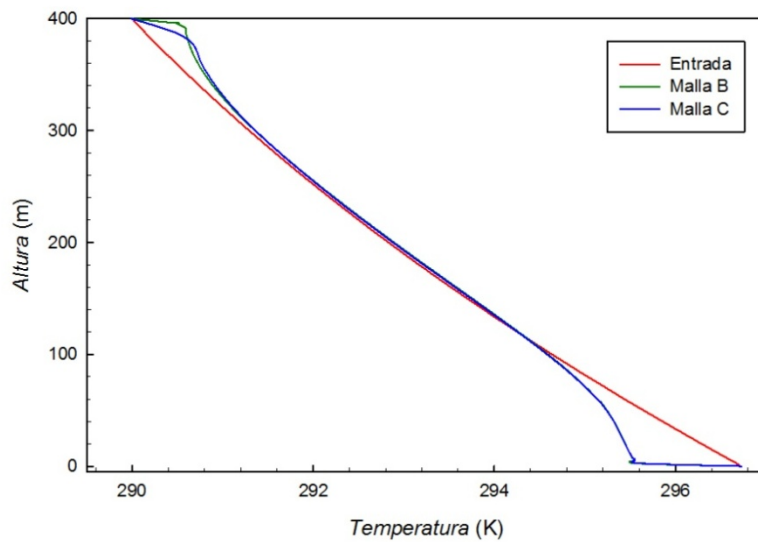


Gráfico 12. Perfiles de temperatura en "Torre meteorológica" en "comparación alargamiento parte superior".

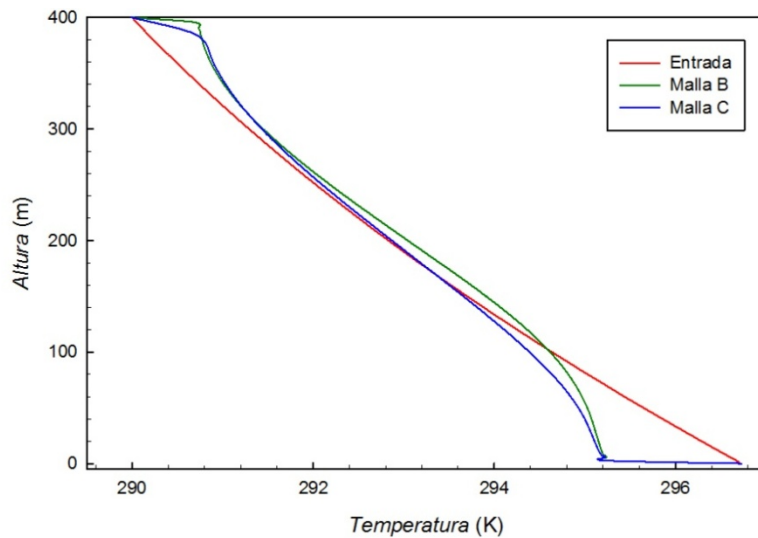


Gráfico 13. Perfiles de temperatura en "salida" en "comparación alargamiento parte superior".

Nuevamente se aprecia que las diferencias son casi inexistentes en la zona de los edificios y en la zona exterior. Tan sólo se pueden observar unas pequeñas diferencias en la zona de salida, pero estas diferencias son minúsculas, de menos de 0.1°C .

A la vista de los seis gráficos anteriores se llega a la conclusión de que la malla C es la más apropiada, ya que da unos resultados similares a los de la malla B, pero teniendo 2.8 millones de elementos, en lugar de los 4.1 millones que tenía la malla B.

3.5.3. Comparación refinado del entorno del edificio principal

Por último se analizará el efecto que tiene refinar los elementos que se encuentran en la zona de alrededor de la torre de refrigeración. Ya que esa zona es la de más interés del dominio, pues en ella es donde se desarrolla el arrastre y la deposición de las gotas de agua que salen de la torre.

A partir de la malla C (2.8 millones de elementos) se obtiene la malla D (3.2 millones de elementos). La modificación consiste simplemente en refinar la zona de alrededor de la torre de refrigeración, dividiendo cada uno de los elementos en cuatro elementos. Es de destacar que la superficie que modeliza la salida de la torre de refrigeración, pasa de tener 64 elementos a tener 256 elementos.

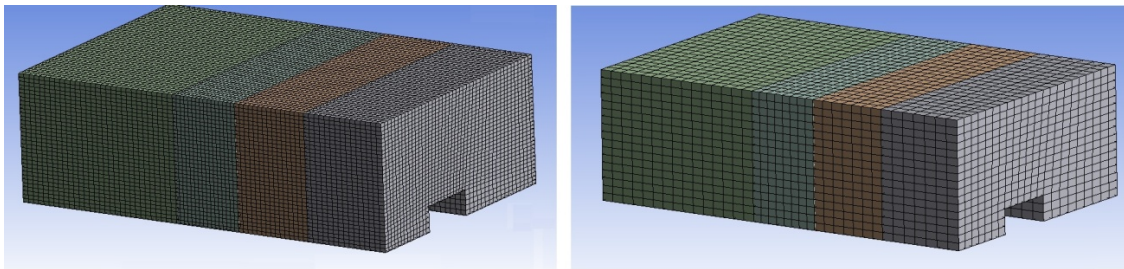


Fig. 22. Detalle del tamaño de los elementos alrededor de la torre de refrigeración. A la izquierda malla C, a la derecha mal D.

La forma de estudiar la influencia del mallado para estas dos mallas es diferente, por un lado se compararán las capas límite viscosa y térmica, igual que en las dos comparaciones anteriores; pero además se analizará la deposición en ambos casos, así como el VMD, parámetro que se explicará en detalle en el capítulo 4.

El caso simulado con ambas mallas para realizar esta comparación ha sido el 31/07/12. Antes de empezar con las comparaciones se mostrará una imagen que muestra el contorno de humedad en los alrededores de la chimenea, así como la malla en uno y otro caso, se observa como el refinado de la malla suaviza los contornos, aunque los valores numéricos sean prácticamente los mismos en ambos casos. Se muestra esta imagen debido a que en este estudio tiene una gran importancia conocer la forma y dimensiones del penacho que sale de la chimenea, ya que ambas son variables muy importantes a la hora de determinar condiciones de atmósfera estable o inestable.

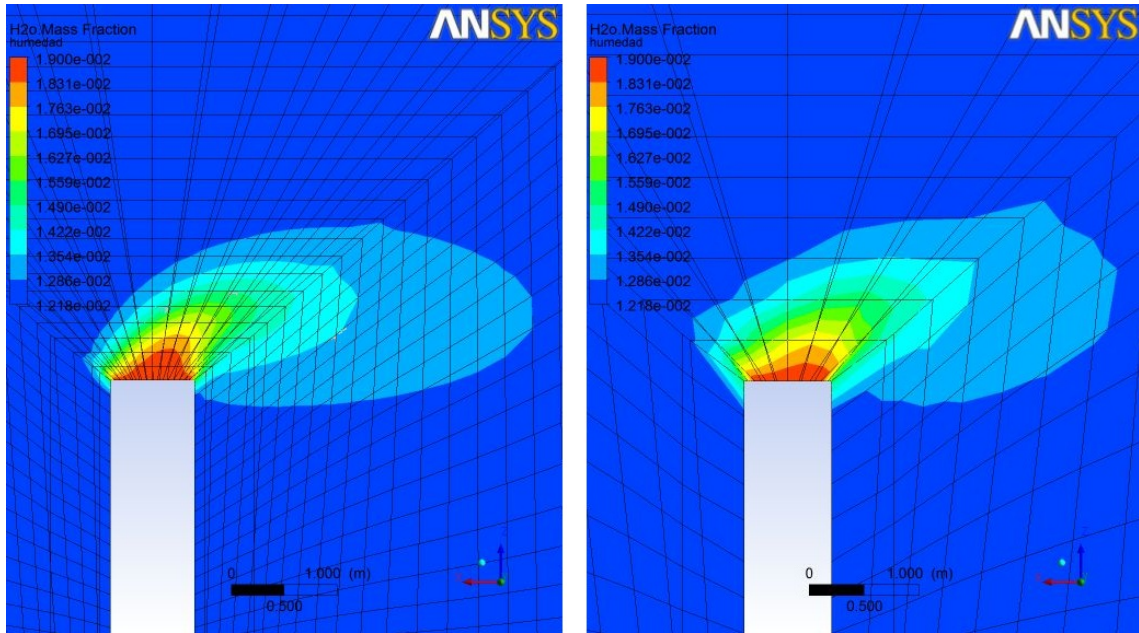


Fig. 23. Comparación del penacho de humedad para el caso 31/07/12. A la izquierda con la malla D, a la derecha con la C.

Se empieza comparando los perfiles de velocidad en los mismos puntos que en las comparaciones anteriores:

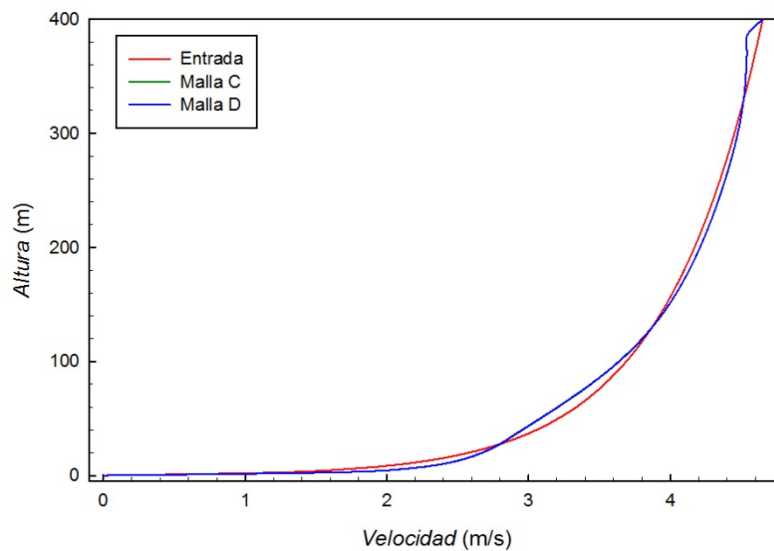


Gráfico 14. Perfiles de velocidad en “exterior” en “comparación refinado”.

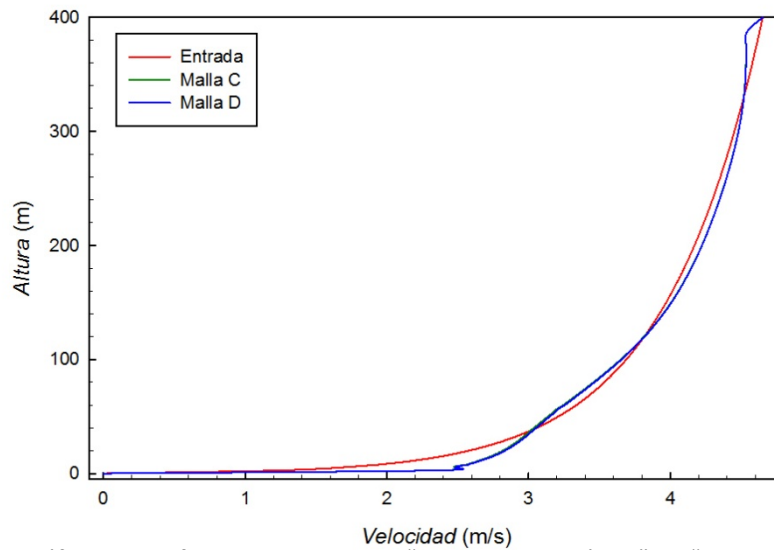


Gráfico 15. Perfiles de velocidad en "Torre meteorológica" en "comparación refinado".

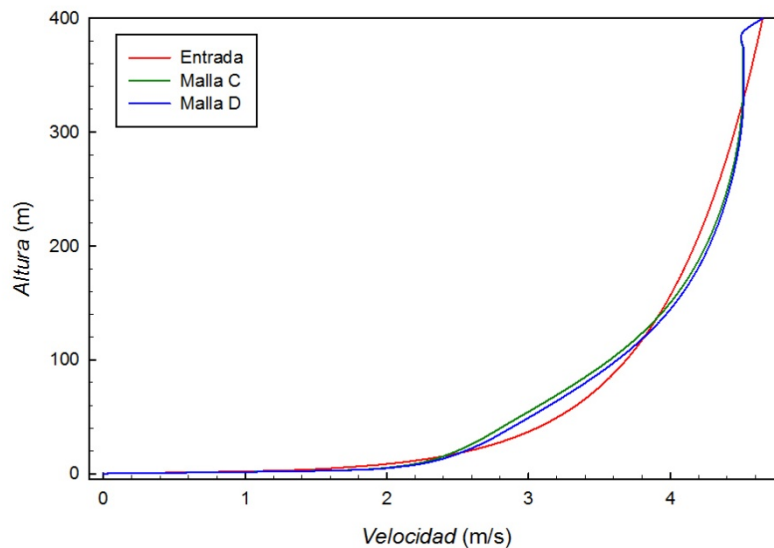


Gráfico 16. Perfiles de velocidad en "salida" en "comparación refinado".

Tal y como era de esperar no hay diferencias apreciables entre los resultados de ambas mallas. Se observa que los perfiles de velocidad tras los edificios (salida) se asemejan más al de entrada que en los casos anteriores, la causa de esto es la condición de contorno en la salida, que en este caso es *outflow*, pero con dos superficies de salida, la influencia de la condición de contorno *outflow* en la salida fue explicada en la sección 3.4.

Para la capa límite térmica se tienen los siguientes resultados:

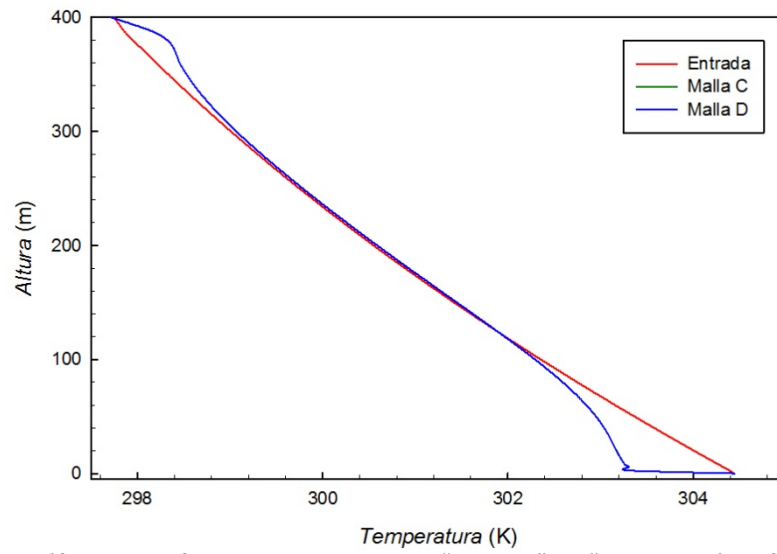


Gráfico 17. Perfiles de temperatura en "exterior" en "comparación refinado".

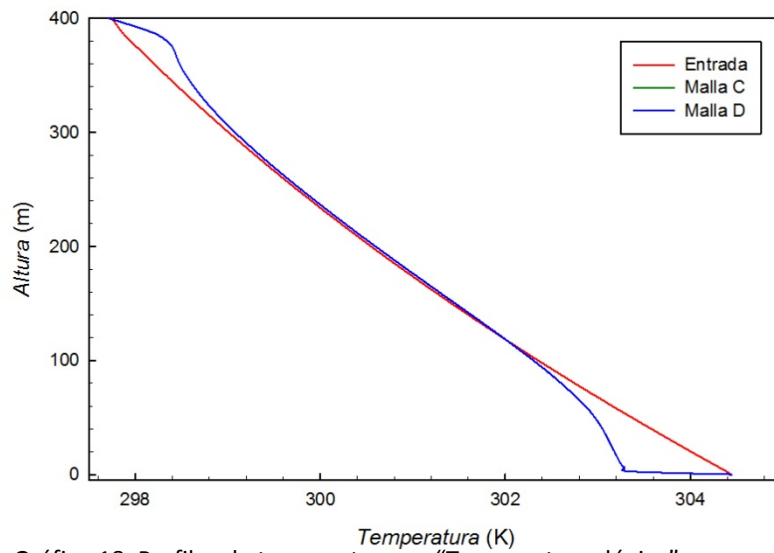


Gráfico 18. Perfiles de temperatura en "Torre meteorológica" en "comparación refinado".

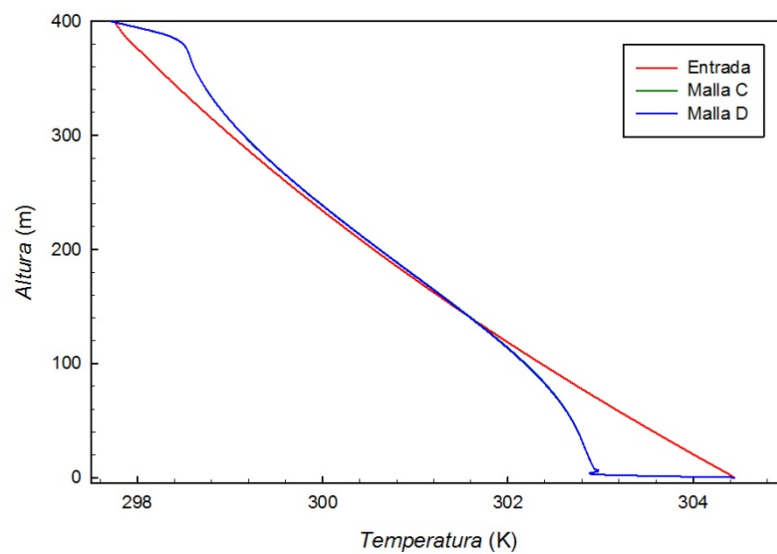


Gráfico 19. Perfiles de temperatura en "salida" en "comparación refinado".

Las diferencias entre los resultados de ambas mallas son casi inapreciables, por lo que se concluye que la modificación que le hemos hecho a la malla C para obtener la D no influye en los perfiles de temperatura y velocidad.

Ahora se analizará la deposición en cada uno de los dos casos y se comparará con la que se ha hallado experimentalmente. La deposición consiste en la masa de agua de las gotas que caen en un punto por unidad de tiempo y de superficie, en el capítulo 4 se explicará con más detalle, para el análisis de la deposición se define una recta virtual, con origen en la torre de refrigeración, y se estudia la deposición en esa línea en función de la distancia a la torre.

En este caso se estudian cinco líneas de deposición.

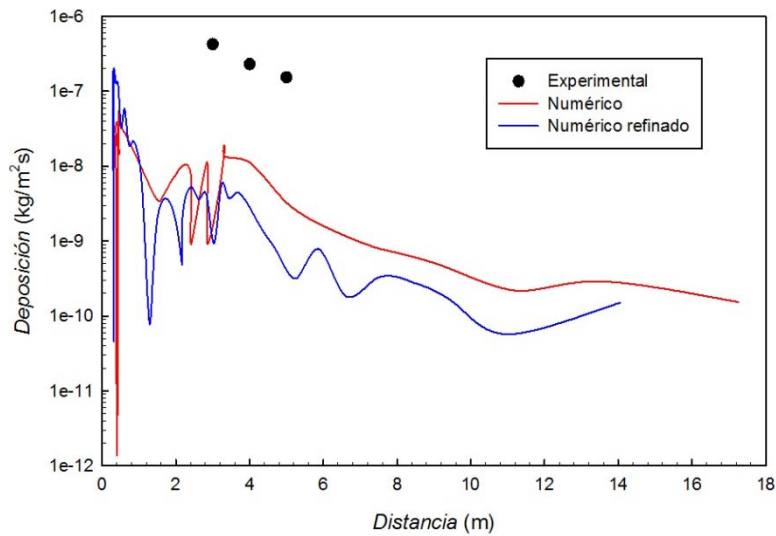


Gráfico 20. Deposición en la línea c243 en "comparación refino".

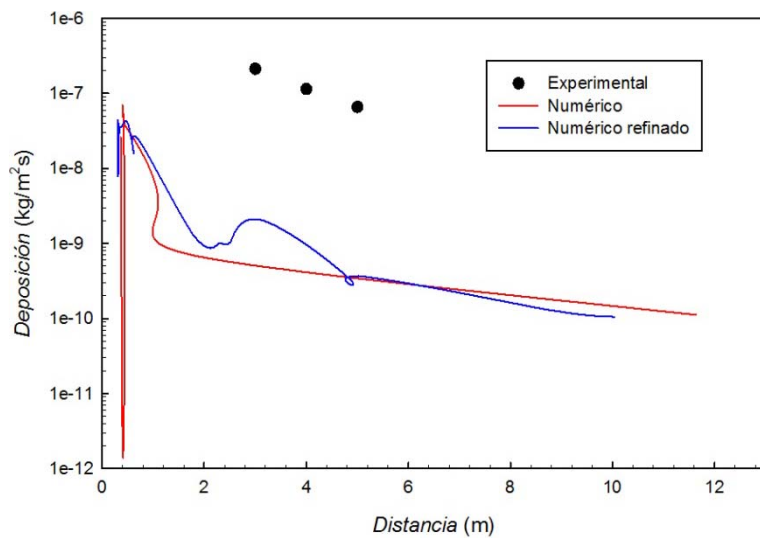


Gráfico 21. Deposición en la línea c258 en "comparación refino".

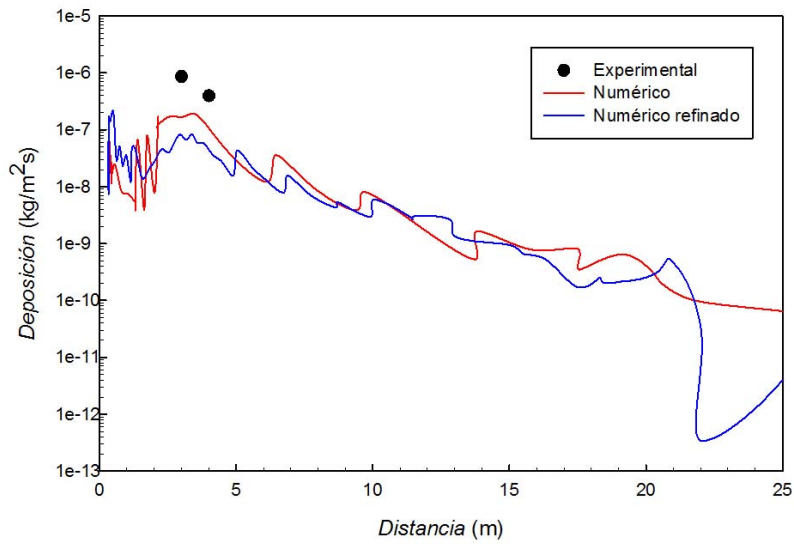


Gráfico 22. Deposición en la línea c273 en "comparación refino".

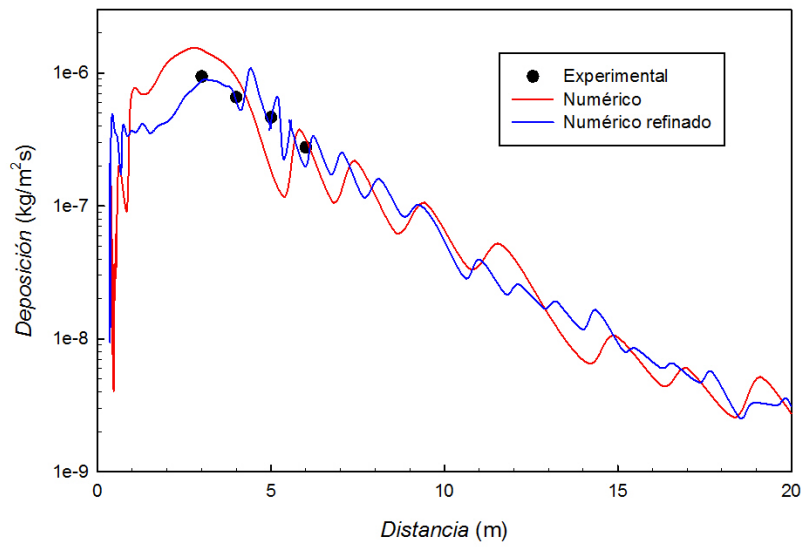


Gráfico 23. Deposición en la línea c288 en "comparación refino".

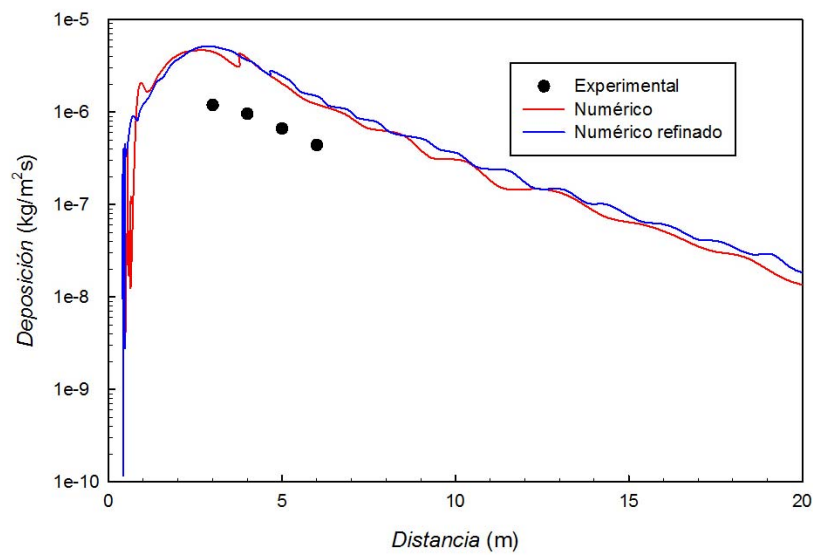


Gráfico 24. Deposición en la línea c303 en "comparación refino".

Claramente se observa que el mallado no influye en la deposición, ya que en ninguna de las cinco líneas hay diferencias significativas entre la malla refinada y la no refinada. La única diferencia es que la malla refinada tiene más muestras, lo que se traduce en que tiene más puntos y más oscilaciones en la curva. De esto se extrae la conclusión de que el refinamiento no influye en la deposición.

Por último se revisa el parámetro VMD, el cual se presenta en una tabla donde también se compara con el experimental. Como hallar el valor del VMD se explicará en el siguiente capítulo.

Tabla 1. Comparación del VMD en “comparación refino”.

	Numérico		Numérico refinado		Experimental
	VMD (mm)	gotas	VMD (mm)	gotas	
C243D3	0.0000	0	0.0586	1	0.3329
C243D4	0.0000	0	0.1648	1	0.3073
C243D5	0.0000	0	0.1169	1	0.2641
C258D3	0.3186	3	0.1611	3	0.3682
C258D4	0.1451	1	0.2946	5	0.3451
C258D5	0.1100	1	0.0604	1	0.2862
C273D3	0.5583	36	0.5655	92	0.4333
C273D4	0.4645	27	0.4734	81	0.3118
C288D3	0.5972	621	0.5994	2252	0.4385
C288D4	0.4907	383	0.5204	1850	0.3733
C288D5	0.4053	219	0.4162	995	0.3334
C288D6	0.3457	137	0.3426	614	0.2972
C303D3	0.5246	3193	0.5441	12229	0.4800
C303D4	0.4438	1780	0.4535	8374	0.4294
C303D5	0.3696	1066	0.3804	5103	0.3662
C303D6	0.3168	684	0.3242	3238	0.3319

La casilla “gotas” indica la cantidad de gotas que caen en ese papelillo en cada una de la simulación numérica. Por lo que un número muy bajo de gotas podría implicar un VMD erróneo, ya que éste es un parámetro estadístico que necesita un número suficiente de muestras para dar un valor consolidado.

Se aprecia que en el refinado caen más gotas en los papelillos, esto es debido a lo comentado anteriormente, ahora la salida de la chimenea tiene más celdas de salida, y el modelo numérico de la fase discreta lanza el mismo número de gotas por celda de salida, por lo que como la refinada tiene cuatro veces más celdas de salida, tendrá el cuádruple de gotas que salgan de la chimenea, por eso llegan más al suelo.

Pero en los papelillos con VMD fiable (los que tienen más de 20 gotas), el VMD es muy similar en el caso refinado que en el caso sin refinar. Por lo que el refinamiento de la malla no influye en el VMD.

Por todo lo anterior (velocidad, temperatura, deposición y VMD) se llega a la conclusión de que refinar la malla en la zona adyacente a la torre de refrigeración no es una buena idea, ya que se aumenta el número de elementos, dando los mismos

resultados. Aún así, algunos casos se simularán con la malla D (refinada), ya que para obtener algunos resultados del modelo numérico, como por ejemplo el penacho de humedad que sale de la torre de refrigeración, es importante tener una malla con la máxima resolución posible en la zona de interés del problema.

3.5.4. Conclusiones del estudio de mallado

Como conclusión se presenta la siguiente tabla con todas las mallas probadas, así como su número de elementos y el tiempo que tardan en hacer 200 iteraciones.

Tabla 2. Resumen de las características de las distintas mallas empleadas para el estudio de mallado.

Denominación	Malla original	Malla A	Malla B	Malla C	Malla D
Nº de millones de elementos	3.4	5.0	4.1	2.8	3.2
Nº de elementos salida de la torre	25	64	64	64	128
Tiempo en calcular 200 iteraciones (minutos)	82	144	112	75	86

La conclusión a la que se ha llegado en este estudio de influencia de mallado, es que la malla C es la más adecuada para el modelo numérico, ya que es ligera y presenta independencia frente a los resultados de velocidad, temperatura, deposición y VMD. Aún así, algunos casos se simularán con la malla D, que tiene los elementos de la zona de la torre de refrigeración de menor tamaño que la malla C. La razón de usar esta malla en algunos casos es poder analizar la forma y dimensión del penacho de humedad con más resolución, ya que el penacho de humedad proporciona información sobre las condiciones atmosféricas de estabilidad o inestabilidad.

Capítulo 4

Validación experimental del modelo numérico

4.1. Introducción

En este capítulo se realizará la validación experimental del modelo numérico, a partir de las medidas tomadas por el grupo de Investigación de la UMH de Elche mediante el ensayo de deposición.

Primero se explicará como el grupo de Investigación de la UMH de Elche obtiene las medidas experimentales, por medio del ensayo de deposición.

En el apartado 4.3 se explicarán los resultados del modelo numérico que se usan para la validación, además del postproceso que se ha de aplicar a algunos resultados para poder compararlos con los datos experimentales.

El apartado 4.4 se corresponde a la validación experimental del modelo puramente dicha, en ella se presentan los resultados, tanto experimentales como numéricos, y se sacan algunas conclusiones al respecto.

En el apartado 4.5 se muestran las conclusiones a las que se llega tras la validación del modelo.

4.2. Adquisición de datos experimentales

Como ya se ha comentado, para la validación del modelo numérico objeto de este Proyecto Fin de Carrera, se dispone de una torre de refrigeración piloto, por medio de la que el Grupo de Investigación de la UMH de Elche realiza ensayos, a partir de los cuales recoge datos que servirán como condiciones de contorno del modelo numérico (ver sección 3.3), y datos que servirán para la validación del modelo.

En la sección 3.3 se ha explicado cómo se obtienen los datos experimentales a partir de los cuales se obtienen las condiciones de contorno para el modelo numérico. A continuación se explicará el ensayo de deposición, que es el ensayo que realiza el Grupo de Investigación de la UMH para obtener los datos de deposición y VMD, a partir de los cuales se tratará de validar el modelo numérico.

El ensayo se realiza con papeles hidrosensibles, al igual que ensayo de arrastre. Se eligen varias direcciones, en las que por la dirección del viento, se presupone que debe de haber deposición. Una vez elegidas las direcciones se colocan varios papeles hidrosensibles por dirección, cada uno situado a una distancia determinada de la torre de refrigeración.

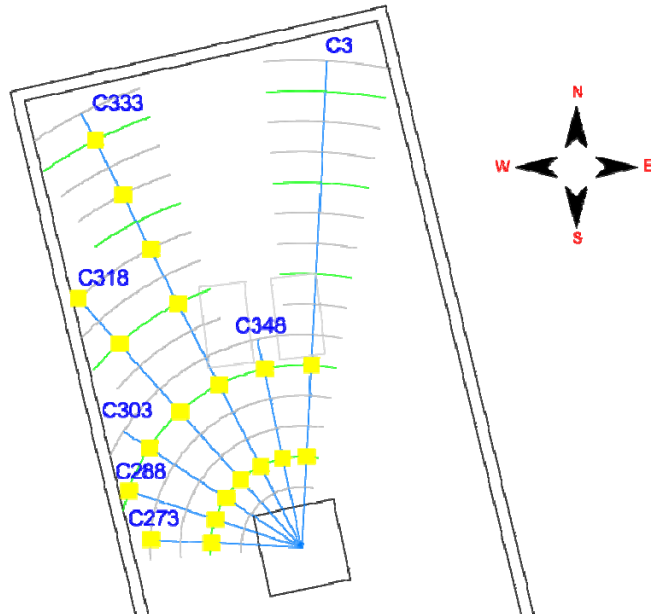


Fig. 24. Situación de los papeles hidrosensibles en las distintas líneas de deposición para el caso 02/10/12.

La denominación de cada papel depende de su dirección y distancia a la torre de refrigeración. El número que procede a la letra C indica la dirección sobre la que se encuentra del papel (medida desde la dirección N en sentido horario), el número que procede a la letra D corresponde a la distancia del papel al centro de la torre de refrigeración. Así la denominación C303D5 corresponde a un papel hidrosensible colocado a una distancia de 5 metros del centro de la torre de refrigeración, cuya línea (del centro de la torre de refrigeración al papel) forma un ángulo de 303 con la línea sur-norte.

Una vez colocados los papeles, se procede al ensayo, se deja la torre de refrigeración funcionar en modo normal, liberando gotas de agua que son arrastradas por el viento, algunas de ellas se depositan sobre los papeles colocados en el suelo.

Tras el ensayo se recogen los papeles, y se procesan por medio de un software informático (tal y como se ha explicado en la sección 3.3). Una vez procesados, el Grupo de Investigación de la UMH de Elche dispone de los diámetros de todas las gotas que han ido a parar a cada papel, con ese dato, la duración del ensayo y la superficie del papel hidrosensible, ya se pueden obtener los datos experimentales de deposición y VMD.

Tabla 3. Resumen de los datos de deposición y VMD obtenidos por el Grupo de Investigación de la UMH de Elche para el caso 02/10/12.

Código muestras	Vol. Agua (mm ³)	VMD (mm)	Flujo másico $m_d(10^{-7})$ (kg/m ² s)
C273D3	3.4444	0.4036	6.9055
C273D5	1.6101	0.3334	3.2280
C288D3	4.2116	0.4057	8.4437
C288D6	1.7158	0.3038	3.4399
C303D3	8.3584	0.4498	16.7574
C303D6	2.2384	0.3126	4.4877
C318D3	9.3741	0.4518	18.7938
C318D6	4.2015	0.3353	8.4234
C318D9	1.3102	0.2527	2.6268
C318D11	0.5919	0.2054	1.1867
C333D3	9.2843	0.5119	18.6137
C333D6	2.6830	0.3172	5.3790
C333D9	0.9140	0.2338	1.8324
C333D11	0.4082	0.2196	0.8184
C333D13	0.1351	0.1730	0.2709
C333D15	0.1210	0.1510	0.2426
C348D3	2.5435	0.4555	5.0994
C348D6	0.7529	0.3136	1.5095
C3D3	0.3374	0.3023	0.6764
C3D6	0.1965	0.2513	0.3940

4.3. Variables a analizar

De entre todas las variables obtenidas del modelo numérico, son las variables relacionadas con la fase discreta las que serán objeto de un estudio más profundo, ya que de ellas se obtendrá la información de las que es objeto nuestro estudio (deposición, alcance, tamaño de las gotas, etc.). Aún así, también es importante procesar y comprobar los datos de la fase continua, con el fin de cerciorarse de la correcta simulación de la capa límite térmica y viscosa de la atmósfera, debido a que el arrastre de la fase discreta es producido por la fase continúa.

Se dividirán los parámetros a estudiar en tres grupos principales:

- Capa límite viscosa y térmica: Perfiles de velocidad y temperatura.
- Deposición de la fase discreta en función de la distancia.
- Tamaño de las gotas de la deposición (Volumen Median Diameter (VMD)).

Es importante remarcar que tanto la deposición como el VMD serán las principales variables de validación, ya serán comparadas con los resultados experimentales obtenidos en el ensayo realizado por el grupo de investigación de la UMH en la torre de refrigeración piloto.

4.3.1. Capa límite viscosa y térmica

El objetivo de analizar los perfiles de velocidad y temperatura obtenidos por el modelo numérico es comprobar la correcta simulación de la capa límite viscosa y térmica. El análisis se realizará mediante la comparación de tres perfiles distintos con el perfil atmosférico ideal, coincidente con el perfil impuesto como condición de entrada al dominio (tanto en velocidad como en temperatura). En los casos en que se disponga de datos experimentales de velocidad y temperatura, obtenidos mediante la torre de medición meteorológica, se compararán los valores obtenidos en el modelo numérico con los experimentales.

La razón de seleccionar temperatura y velocidad como variables de estudio se debe a que estas variables son las más importantes a la hora de modelizar la capa límite térmica y viscosa.

Si alguno de los perfiles tanto de temperatura o de velocidad se deformara excesivamente, desviándose del perfil de entrada, habría un problema en el caso, y los resultados de deposición y VMD podrían no ser fiables. Los motivos por los cuales los perfiles se desviarán anómalamente pueden ser varios, desde fallos en el modelo a falta de convergencia, pasando por errores al introducir las condiciones de contorno.

La situación de cada una de las rectas a partir de las cuales se sacarán los perfiles será la misma que se usó para estudiar la influencia del mallado. Serán cuatro rectas situadas en puntos singulares del dominio:

- Una recta situada en la entrada del dominio, su perfil coincidirá con el introducido como condición de contorno. El objetivo de este perfil es servir como referencia al comparar el resto de perfiles. Su nombre será “entrada”.
- Una recta situada a mitad del dominio (a 400 metros tanto de la salida como de la entrada), pero lejos de la zona de los edificios. La función de este perfil es estudiar cómo varía el perfil de velocidades que no encuentra ningún obstáculo en su camino. Su nombre será “exterior”.
- Una recta situada detrás del edificio donde se encuentra la torre de refrigeración piloto, su ubicación coincide con la de la torre de medición meteorológica existente en la realidad. El objetivo de este perfil es ver cómo se comporta el perfil ante obstáculos, en este caso edificios, además de servir como base para la validación experimental, ya que las medidas experimentales se toman en esa situación. La denominación de esta recta será “torre meteorológica”.
- Una recta situada detrás de la zona de los edificios, a tan sólo 100 m de la salida. El propósito de este perfil es analizar los efectos que han tenido los obstáculos en el perfil, una vez que el perfil ha superado esos obstáculos. Esta recta se llamará “salida”.

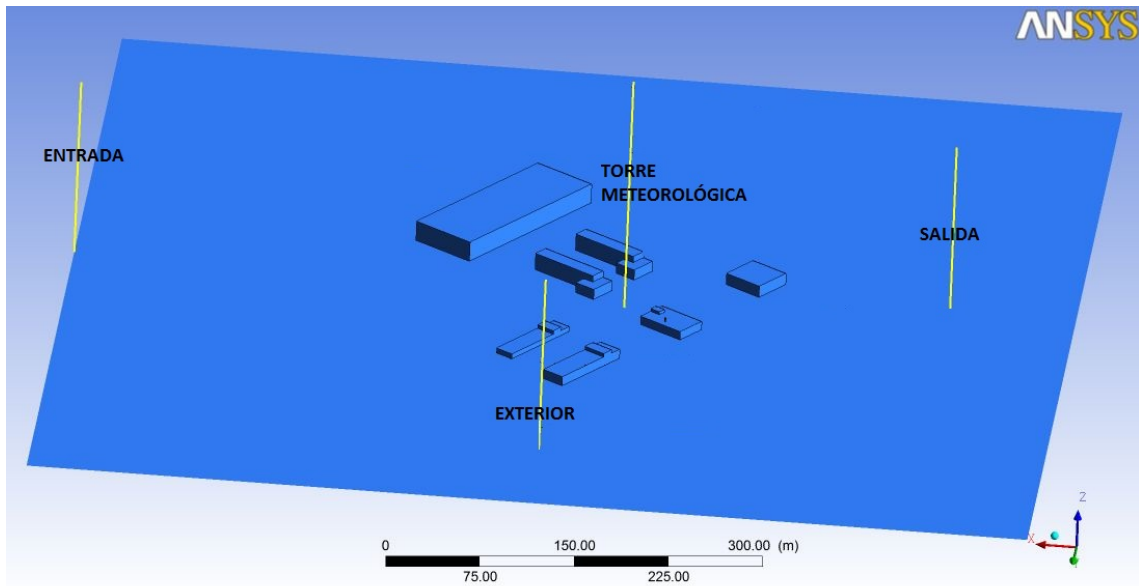


Fig. 25. Situación de los perfiles de velocidad y temperatura usados en la validación experimental.

La torre de medición meteorológica entró en funcionamiento en octubre de 2012, luego a partir del caso 4 (22/10/2012) se dispondrá de datos experimentales de velocidad y temperatura para realizar la validación experimental de las capas límite térmica y viscosa, mediante el perfil “torre meteorológica”.

4.3.2. Deposición

La deposición es la variable más importante en el modelo numérico, ya que servirá para predecir la zona de influencia de posibles agentes patógenos presentes en las gotas de agua, como podría ser la Legionella.

La deposición se define como la masa de agua que se deposita por unidad de superficie por unidad de tiempo (los kg de agua que caen en un m^2 de superficie en un segundo). Su unidad es el $kg/m^2 \cdot s$.

La forma de analizar la deposición es estudiando la deposición en función de la distancia para una dirección dada. Las direcciones seleccionadas coincidirán con las elegidas por el Grupo de Investigación de la UMH (ver sección 4.2). Del modelo numérico se extraerán los datos de deposición en cada una de las líneas de deposición a analizar, así como las distancia a la torre de refrigeración. Así se podrán comparar los valores experimentales puntuales con el valor numérico a lo largo de toda la línea de deposición.

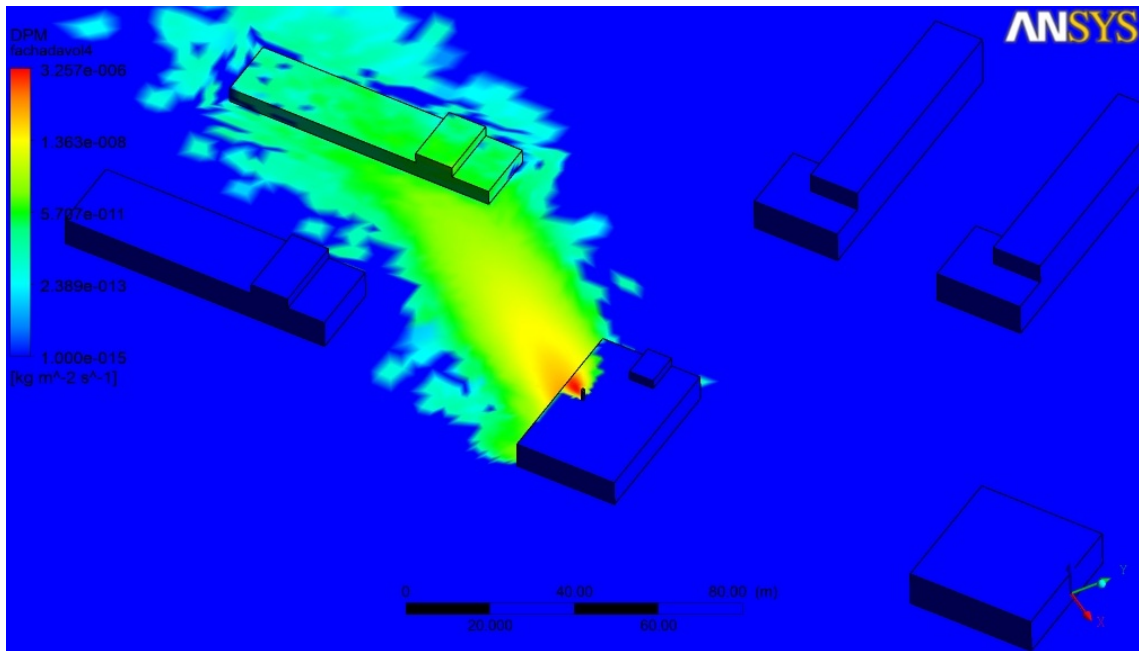


Fig. 26. Imagen de la deposición obtenida tras la simulación del caso 22/10/12. Se observa una fuerte atenuación de la deposición con la distancia, ya que la escala de color es logarítmica.

Se debe de tener en cuenta que el destino de las gotas no es sólo la deposición, sino que parte se evapora, y otra parte es arrastrada por la atmosfera fuera del dominio estudiado, al final se presentará un resumen en donde se incluirá el porcentaje de agua depositada, evaporada y que escapa del dominio, relacionando los resultados con las condiciones meteorológicas del caso.

4.3.3. VMD

El VMD (Volumen Median Diameter) de cada papel hidrosensible sirve para caracterizar el tamaño de las gotas que se depositan en el papel, algo de lo que la deposición no daba información.

El VMD se define en un grupo de gotas de diferente diámetro, como el diámetro que provoca que la suma de masa de todas las gotas con diámetros menores que él, sea el 50 % de la masa total del conjunto de gotas.

Para obtenerlo experimentalmente se hace lo siguiente:

- Una vez procesados los papeles hidrosensibles, se ordenan los diámetros obtenidos de menor a mayor.
- Se saca la masa individual de cada gota, a partir de su diámetro y sabiendo que todas las masas tienen igual densidad.
- Se suma la masa de cada gota para sacar la masa total de agua en el papel hidrosensible.

- Se suman, una a una, y siguiendo el orden de menor a mayor las masas de las gotas, hasta que la suma sea la mitad de la masa total, el diámetro de la última gota sumada se corresponde con el VMD.

Para obtener el VMD numérico el proceso es más complicado, teniendo que recurrir a las trayectorias de las partículas. Uno de los principales problemas para obtener el VMD es saber la contribución de cada trayectoria al gasto másico total, ya que *Fluent* proporciona datos del diámetro de la gota de la trayectoria, pero eso no quiere decir que sólo haya una gota en la trayectoria. Para explicarlo con todo detalle, primero se ha de entender la manera en que *Fluent* modela las trayectorias de la fase discreta.

En *Fluent* se define una inyección de gotas de agua, que saldrá al exterior (donde interactuará con la fase continua) por medio de una superficie, esta superficie tendrá varias celdas de salida al exterior (n_c). El usuario debe definir los parámetros de la distribución Rosin-Rammler que saldrá al exterior desde la chimenea, especificando el diámetro menor y mayor de la distribución, el número diferente de diámetros por elemento de la superficie de salida al exterior (n_d), y los parámetros de la distribución (parámetro de dispersión (n) y diámetro medio (\bar{d})). Además, para modelar los efectos de la aleatoriedad de las trayectorias, el usuario podrá introducir de número de trayectorias a simular (n_t), es decir el número de trayectorias que habrá por cada diámetro diferente en cada uno de los elementos de la superficie por donde se libera la inyección.

Una vez introducidos todos los parámetros anteriores, *Fluent* lanza por cada celda de salida de la superficie, n_r trayectorias compuestas distintas, cada una de ellas con n_d gotas (una de cada diámetro). Por lo que el número total de trayectorias a rastrear (n_t) será:

$$n_t = n_c \cdot n_r \cdot n_d \quad (4.1)$$

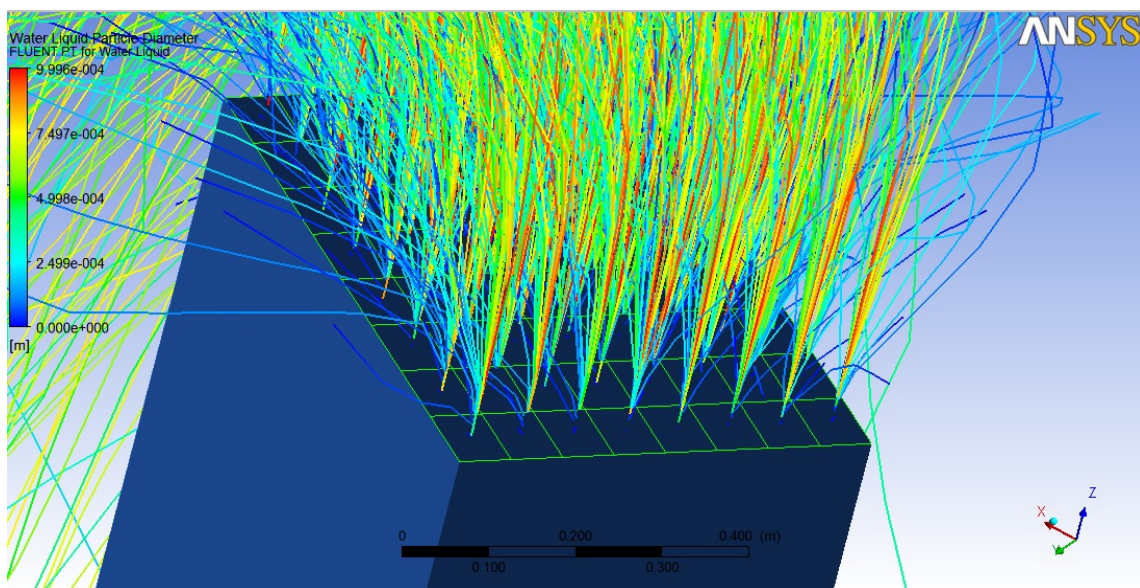


Fig. 27. Detalle de la distribución de tamaños de las gotas al salir de la torre de refrigeración. Por cada celda de la superficie de salida al exterior salen tantas trayectorias como diferentes diámetros hay, ya que n_t es 1 en este caso.

Se observa que se tiene un número considerable de trayectorias, y que hay las mismas trayectorias para cada tamaño de gota ($n_c \cdot n_r$). Además, el diámetro de la gota de cada trayectoria va evolucionando a lo largo del recorrido, debido a los fenómenos de evaporación. Sería un error pensar ahora que la masa de cada trayectoria es la masa de una gota del diámetro que transporta la trayectoria. Otro punto importante es que *Fluent* no ha tenido todavía en cuenta los parámetros de la Rosin-Rammler (n, \bar{d}).

La clave está en que cada trayectoria no representa la evolución de una gota que salió de la chimenea con un diámetro determinado, sino que cada trayectoria representa la evolución de un grupo de gotas que salieron de la chimenea, todas ellas con el mismo diámetro. Para obtener cuantas gotas hay en cada trayectoria acudimos a la ecuación de la distribución Rosin-Rammler, que relaciona el diámetro de la gota (d) con la fracción másica de las gotas mayores que ella Y_d .

$$Y_d = e^{-(d/\bar{d})^n} \quad (4.2)$$

Ahora se tratará de obtener la contribución másica de cada trayectoria a partir de su diámetro, en una distribución Rosin-Rammler:

- Se supondrá una inyección compuesta por n_d (número de diámetros) trayectorias diferentes, cada trayectoria estará compuesta por un número diferente de gotas, pero todas las gotas de una misma trayectoria tendrán igual diámetro.
- Se ordenan las trayectorias según su diámetro, de menor a mayor.
- Se conoce el diámetro de las gotas de cada trayectoria, a partir de él se calcula la fracción másica que representan las gotas mayores que ella. Para ello se parte del cálculo de Y_d (fracción másica de las gotas con mayor diámetro que d). Para la trayectoria i :

$$Y_{di} = \frac{\sum_{j=i+1}^{j=n_d} m_j}{\sum_{j=1}^{j=n_d} m_j} \quad (4.3)$$

donde m_j es la fracción másica de la trayectoria j . La masa total m_t es $\sum_{j=1}^{j=n_d} m_j$

Para la trayectoria inmediatamente inferior $i - 1$:

$$Y_{d(i-1)} = \frac{\sum_{j=i}^{j=n_d} m_j}{\sum_{j=1}^{j=n_d} m_j} \quad (4.4)$$

Se restan las ecuaciones (4.3) y (4.4) y queda:

$$Y_{di} - Y_{d(i-1)} = \frac{\sum_{j=i+1}^{j=n_d} m_j}{\sum_{j=1}^{j=n_d} m_j} - \frac{\sum_{j=i}^{j=n_d} m_j}{\sum_{j=1}^{j=n_d} m_j} = \frac{m_i + \sum_{j=i}^{j=n_d} m_j - \sum_{j=i}^{j=n_d} m_j}{m_t} = \frac{m_i}{m_t} \quad (4.5)$$

Apréciase que $\frac{m_i}{m_t}$ es la fracción másica de cada trayectoria, y que se puede relacionar con los parámetros de la distribución Rosin-Rammler, ya que los valores de Y_{di} e $Y_{d(i-1)}$ se pueden obtener de la formula (3.47).

Para el modelo numérico, en que se tiene n_r trayectorias compuestas, y n_c celdas de salida, se deberá dividir la fracción másica f_{mi0} (de la trayectoria i , en el instante inicial (0)) entre las trayectorias compuestas y las celdas de salida.

$$f_{mi0} = \frac{e^{-(d_i/\bar{d})^n} - e^{-(d_{i-1}/\bar{d})^n}}{n_c \cdot n_r} \quad (4.6)$$

El último paso es relacionar la fracción másica obtenida con el diámetro, de manera que en todo momento se pueda saber la fracción másica que lleva la gota, incluso si se ha evaporado en parte. Para ello se pondrá la fracción másica como producto de un coeficiente c_i por el cubo del diámetro de la gota recién salida de la torre de refrigeración d_{i0} (tiene el diámetro inicial por no haber sufrido evaporación). El diámetro va disminuyendo debido a la evaporación, pero el coeficiente c_i se mantiene constante.

$$f_{mi0} = c_i \cdot d_{i0}^3 \quad (4.7)$$

Por lo que el coeficiente buscado para la trayectoria i sería:

$$c_i = \frac{e^{-(d_i/\bar{d})^n} - e^{-(d_{i-1}/\bar{d})^n}}{n_c \cdot n_r \cdot d_{i0}^3} \quad (4.8)$$

El coeficiente constante c_i estrictamente sería:

$$c_i = n_{gt} \cdot \rho \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \quad (4.9)$$

donde n_{gt} es el número de gotas que transporta la trayectoria.

La fracción másica de la trayectoria en cualquier instante es:

$$f_{mi} = c_i \cdot d_i^3 \quad (4.10)$$

Resumiendo, a la conclusión que se ha llegado tras anterior razonamiento es que a partir de los diámetros iniciales de las trayectorias y de los parámetros de la distribución Rosin-Rammler (n, \bar{d}), se puede calcular el coeficiente que representa el número de gotas de cada trayectoria c_i , y a partir de él obtener la fracción másica de la trayectoria en cualquier momento, ya que se puede obtener el diámetro en cualquier punto de la trayectoria.

Para hallar el VMD de cada papelillo se ha desarrollado un pequeño código de *Matlab*, que necesita las siguientes entradas:

- Datos de la inyección discreta: número de diámetros n_d , número de celdas en la superficie de salida de la torre n_c , número de trayectorias

compuestas n_r , gasto másico de la inyección y parámetros de la distribución Rosin-Rammler (n, \bar{d}).

- Coordenadas x e y de cada papelillo, así como las dimensiones de los papeles hidrosensibles.
- Archivo de todas las trayectorias que salen de la chimenea en el instante inicial, incluyendo: ID (nº de trayectoria) y diámetro inicial.
- Archivo con las trayectorias que han quedado en el suelo (se consigue filtrando las trayectorias a la altura de la terraza del edificio $z = 7.27\text{m}$), este archivo debe incluir: ID de la trayectoria, diámetro con que ha alcanzado el suelo, coordenada x y coordenada y .

El algoritmo usado para el código de *Matlab* es el siguiente:

- Se ordenan los diámetros de salida, y se calcula el coeficiente c_i de cada trayectoria, mediante la ecuación (4.8).
- Se identifican las ID de las trayectorias que llegan al suelo con las ID de las trayectorias de la salida, con el fin de saber el c_i de las trayectorias que llegan al suelo (de las que ya se sabe el diámetro).
- Se relacionan las coordenadas x e y de las trayectorias que han alcanzado el suelo por la posición de cada papelillo, para ver si han caído sobre él.
- Para cada papelillo se ordenan las trayectorias que lo han alcanzado y se obtiene el VMD, ya que se tiene el coeficiente y el diámetro de cada gota que cae en el papelillo.

El código de *Matlab* se adjunta en el anexo I del presente proyecto.

Con el código anterior también se obtiene el parámetro de deposición en cada papelillo, pero calculado a partir de las trayectorias, lo que se hace es sumar la fracción másica de cada una de las trayectorias que alcanzan el papelillo, multiplicarlo por el gasto másico de la inyección y dividirlo entre la superficie del papelillo. Los resultados de deposición que se obtienen de esta manera son idénticos a los que da *Fluent* (ver sección 4.2), algo que es totalmente lógico, ya que *Fluent* calcula la deposición a partir de las trayectorias. Es por esta razón que no se han incluido estos resultados de deposición a partir de trayectorias en este proyecto.

4.4. Validación experimental

4.4.1. Introducción a la validación experimental

Para realizar la validación experimental del modelo numérico se dispone de medidas experimentales de diez casos diferentes, cada uno con diferentes condiciones atmosféricas (velocidad y dirección del viento, temperatura, humedad relativa, etc). Cada uno de dichos casos será simulado mediante el modelo numérico, con el fin de poder comparar los casos y estudiar la fiabilidad del modelo numérico.

A continuación se presenta una tabla resumen de los casos simulados:

Tabla 4. Resumen de las características principales de los casos simulados.

nº Caso	Fecha	Estación	Velocidad viento	Dirección viento
1	18/06/2012	Verano	Alta	NO
2	31/07/2012	Verano	Baja	NO
3	02/10/2012	Verano	Baja	NO
4	22/10/2012	Primavera	Baja	SE
5	11/01/2013	Invierno	Alta	SE
6	14/02/2013	Primavera	Baja	SE
7	26/02/2013	Invierno	Alta	SE
8	22/03/2013	Primavera	Baja	NO
9	07/06/2013	Verano	Alta	NO
10	13/06/2013	Verano	Baja	NO

La estación del año se determina a partir de la temperatura ambiente a la altura de 10.56 metros del día en que se tomaron las medidas del caso: el caso es calificado como invernal si la temperatura registrada es menor de 15°C, las condiciones de primavera requieren temperaturas de entre 15°C y 20°C, si la temperatura es mayor de 20°C el caso se calificará como veraniego. Velocidad alta es mayor de 3 m/s, mientras velocidad baja es cuando la velocidad medida a 10.56 m es menor de 3 m/s. La dirección predominante se obtiene a partir del ángulo que forma la dirección del viento con la dirección norte. Más adelante se presentarán los resultados, especificando en ellos la magnitud exacta de velocidad y temperatura tomada experimentalmente.

A continuación se presentará un caso modelo, concretamente el caso 3 (22/10/2012), explicando cada uno de los resultados o gráficas obtenidos a partir del modelo numérico (sus variables de interés). Este caso modelo servirá para que el lector se familiarice con los resultados que se obtendrán en cada caso. Se presentarán los resultados de cada una de las simulaciones, pero divididos en tres secciones: primero la capa límite viscosa, luego la térmica, y por último los resultados de la fase discreta (deposición y VMD). Los resultados del caso modelo son los siguientes:

- Capa límite viscosa:

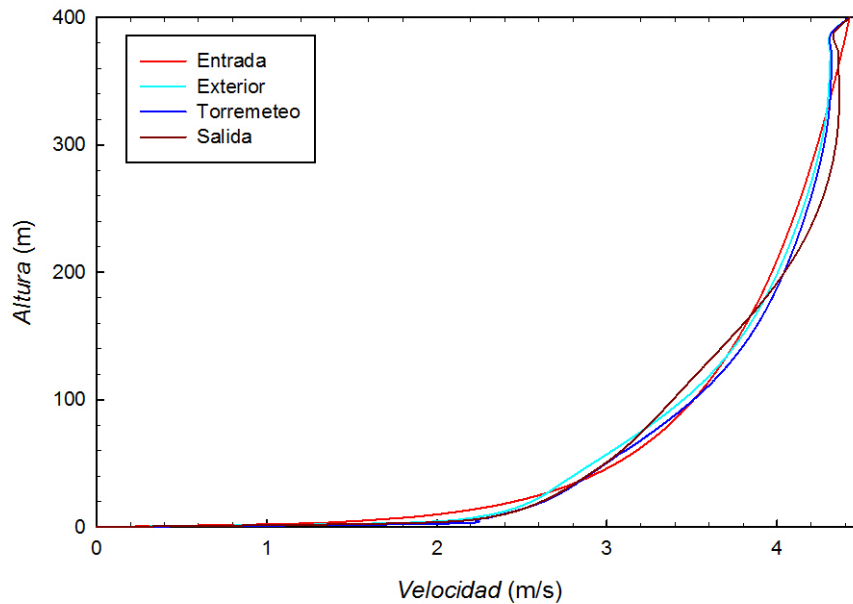


Gráfico 25. Perfiles de velocidad característicos para el caso 02/10/12.

Esta primera gráfica servirá para estudiar la capa límite viscosa. Una de los perfiles representados es el perfil de entrada, que cumple la ecuación (3.40). Mediante esta gráfica se podrán detectar problemas de homogeneidad horizontal en la capa límite viscosa, ya que si para una misma altura (eje Y del gráfico) los valores de velocidad en cada uno de los perfiles son muy diferentes significará que no hay homogeneidad horizontal en la capa límite viscosa. Otro problema que se podrá detectar con esta gráfica es la deformación excesiva de los perfiles de velocidad, si esto ocurriera, los distintos perfiles serían muy diferentes del de entrada, y sería un problema, ya que en la realidad el perfil de velocidad va variando ligeramente al cambiar de posición, pero no sufre grandes deformaciones por la presencia de edificios bajos. Por último, a través de esta gráfica se podrá analizar el efecto que los edificios producen sobre el perfil de velocidades (el perfil Torremeteo se encuentra entre los edificios), así como la recuperación del perfil de velocidad una vez superado los edificios (el perfil salida se encuentra pasada la zona de los edificios). A partir del caso 4 (22/10/12) se añadirán los datos experimentales obtenidos mediante la torre de medición meteorológica.

- Capa límite térmica:

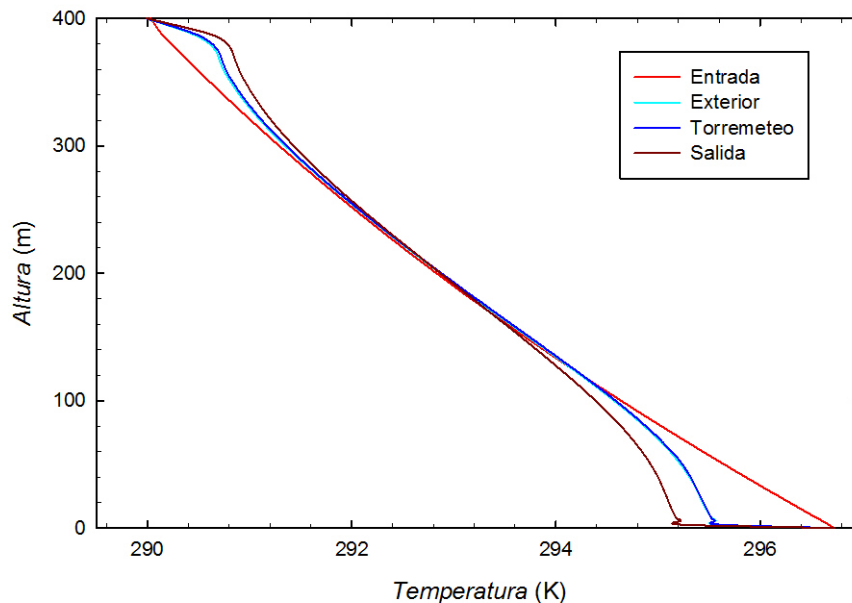


Gráfico 26. Perfiles de temperatura característicos para el caso 02/10/12.

Esta gráfica servirá para analizar la capa límite térmica. Nuevamente están representados cuatro perfiles distintos de temperatura, uno de ellos es el de la temperatura a la entrada, sacada a partir del perfil de temperaturas explicado en la sección 3.3. Con este gráfico se podrá comprobar la homogeneidad horizontal de la capa límite térmica, así como apreciar si hay alguna deformación excesiva de algún perfil de temperaturas. También se podrá obtener la influencia de los edificios en la capa límite térmica, y analizar la forma en que se recupera el perfil de temperatura una vez rebasada la zona de los edificios. Antes de continuar es importante remarcar un pequeño detalle, en la gráfica se aprecia que para alturas bajas (menos de 100 m) se produce una bajada de temperaturas conforme se avanza en el dominio, la explicación a este fenómeno se encuentra en la convección natural, el modelo tiene fijada la temperatura en el suelo (es igual a la del perfil de entrada en el suelo), pero el aire en contacto con el suelo se calienta y asciende, lo que provoca la bajada de temperatura, en la parte superior del dominio ocurre lo contrario, el aire caliente que asciende eleva la temperatura del aire de la parte superior, el cual no puede escapar por ser el techo una pared móvil con la temperatura fijada. Aún así, vemos que la diferencia de temperatura de los perfiles respecto al de entrada en las alturas bajas es mínima, aproximadamente de 0.2°C en la zona de los edificios (mitad del dominio), y de 0.4°C en la zona final del dominio. A partir del caso 4 (22/10/12) se incluirán las temperaturas obtenidas experimentalmente mediante la torre de medición meteorológica.

- Deposición:

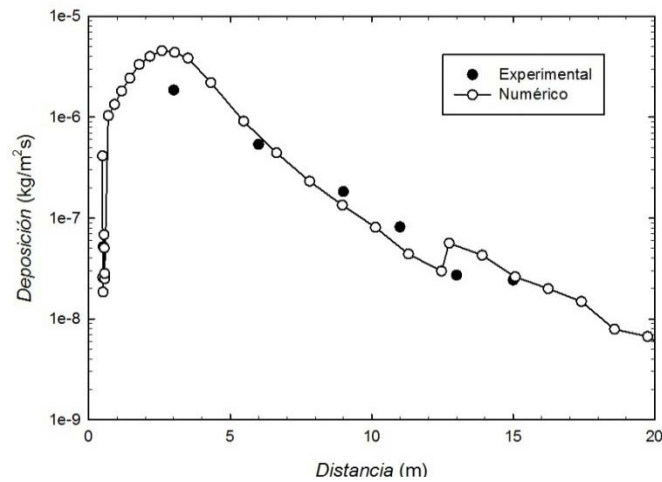


Gráfico 27. Deposición en la línea c333 del caso 02/10/12.

Se presentarán tantas gráficas de deposición en cada caso como cuerdas se hayan puesto para medir la deposición experimental. Es importante recordar que cada línea de medida forma un ángulo diferente respecto a la dirección norte. Estas gráficas tienen varios fines:

- Estudio de la deposición frente a la distancia: Analizando los valores de deposición frente a distancia para una misma línea se podrían detectar problemas de velocidad del viento, ya que si los valores numéricos y experimentales fueran muy diferentes podría deberse a que la velocidad del viento en la zona de la torre de refrigeración es distinta en el modelo numérico que en la realidad; aunque también podría deberse a otros problemas como la distribución de tamaños de las gotas de la fase discreta, o diferencias de evaporación entre la realidad y el modelo numérico, donde ya entraría en juego la temperatura de las gotas, la temperatura atmosférica y la humedad entre otras variables.
- Estudio de la deposición frente al ángulo: comparando las diferentes líneas de deposición se podrá estudiar cual ha sido la línea de máxima deposición en las medidas experimentales y en el modelo numérico. Si hubiera una diferencia considerable entre ambos podría deberse a que la dirección del viento elegida no sea la más apropiada (ver sección 3.4.1 donde se explica la incertidumbre que conlleva la elección de la velocidad del viento).

Con el estudio de la deposición frente al ángulo también se podrá analizar los efectos de los edificios sobre la deposición: lo lógico sería que la línea de máxima deposición se correspondiera con la línea que estuviera alineada con la dirección del viento, pero podría presentarse la situación de que en nuestro modelo numérico no pasará eso, la razón sería la presencia de edificios que desviaría al viento que arrastra las gotas.

- Volumen Median Diameter (VMD):

Tabla 5. Resumen de VMD para el caso 02/10/12.

Papelillo	Medidas experimentales VMD (mm)	Modelo numérico VMD(mm)	Gotas
C273D3	0.4036	0.3362	8
C273D5	0.3334	0.2471	6
C288D3	0.4057	0.5532	379
C288D6	0.3038	0.3343	70
C303D3	0.4498	0.5360	4218
C303D6	0.3126	0.3307	550
C318D3	0.4518	0.4905	6482
C318D6	0.3353	0.3112	909
C318D9	0.2527	0.2198	296
C318D11	0.2054	0.2028	168
C333D3	0.5119	0.5064	1254
C333D6	0.3172	0.3206	186
C333D9	0.2338	0.2322	49
C333D11	0.2196	0.2395	23
C333D13	0.1730	0.1992	15
C333D15	0.1510	0.2172	9
C348D3	0.4555	0.3984	62
C348D6	0.3136	0.2469	14
C3D3	0.3023	0.1924	4
C3D6	0.2513	0.0000	0

La variable VMD, tal y como se explico en la sección anterior, está relacionada con la distribución de los tamaños de las gotas que caen en cada papelillo. El número de gotas que caen en cada papelillo, también explicado antes, sirve para descartar algunos resultados, y considerarlos no válidos, ya que el VMD es un parámetro estadístico de la distribución de las gotas (una mediana), y si se tiene menos de 20 datos en el papelillo se considerará el VMD obtenido como no fiable. Cuando ocurre lo anterior (que un papelillo tiene menos de 20 gotas) significa que no hay apenas deposición en ese papelillo, detalle que se podría comprobar recurriendo a las gráficas de deposición frente a distancia.

El VMD está relacionado con la distribución de tamaños de la inyección, es decir con los parámetros de la distribución Rosin-Rammler (n, \bar{d}), aunque una vez que las gotas de la fase discreta salen a la atmósfera son arrastradas por el aire, además de sometidas a efectos de transferencia de masa (evaporación), por lo que las condiciones de velocidad, temperatura y humedad en la zona de la torre de refrigeración serán también determinantes a la hora de analizar el VMD.

En cuanto a las diferencias entre el VMD numérico y teórico, se considerará una buena concordancia cuando las diferencias sean menores de 0.05 mm. También se analizará cómo evoluciona el VMD en cada línea de deposición: lo lógico es que en los papelillos más cercanos a la torre se depositen gotas más grandes, que por su peso caen antes al suelo, y conforme el papelillo esté más lejos de la torre tendrá menos VMD.

4.4.2. Capa límite viscosa.

A continuación se presentan los resultados obtenidos a través de los campos de velocidad en cada uno de los casos:

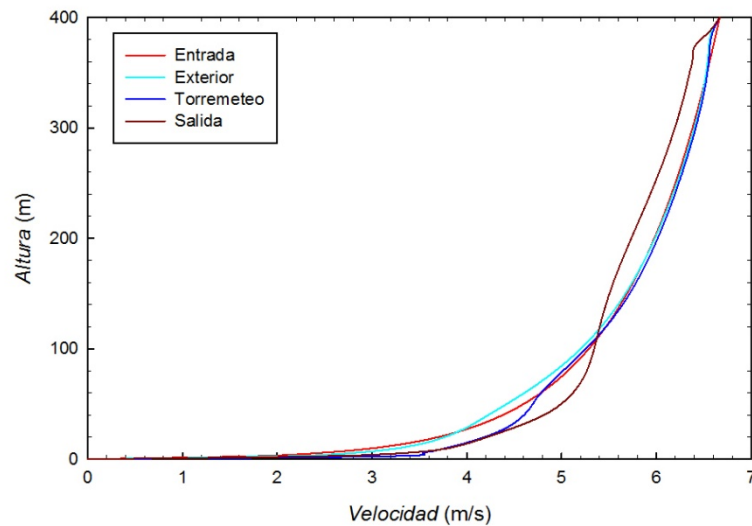


Gráfico 28. Perfiles de velocidad característicos del caso 1 (18/06/12).

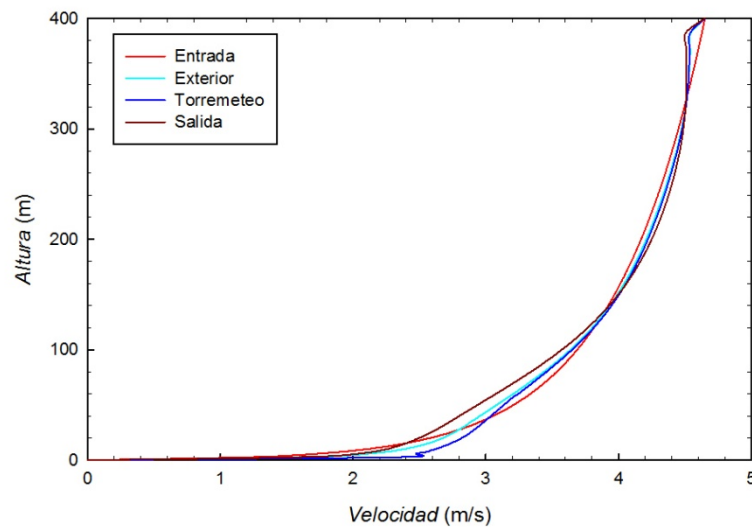


Gráfico 29. Perfiles de velocidad característicos del caso 2 (31/07/12).

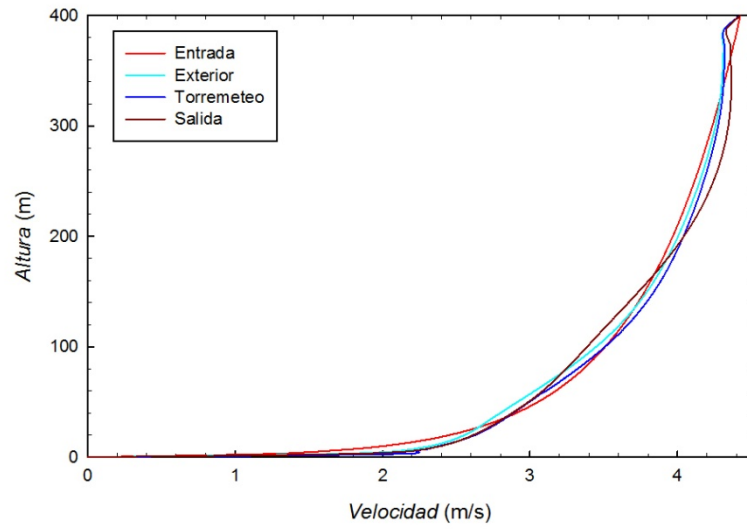


Gráfico 30. Perfiles de velocidad característicos del caso 3 (02/10/12).

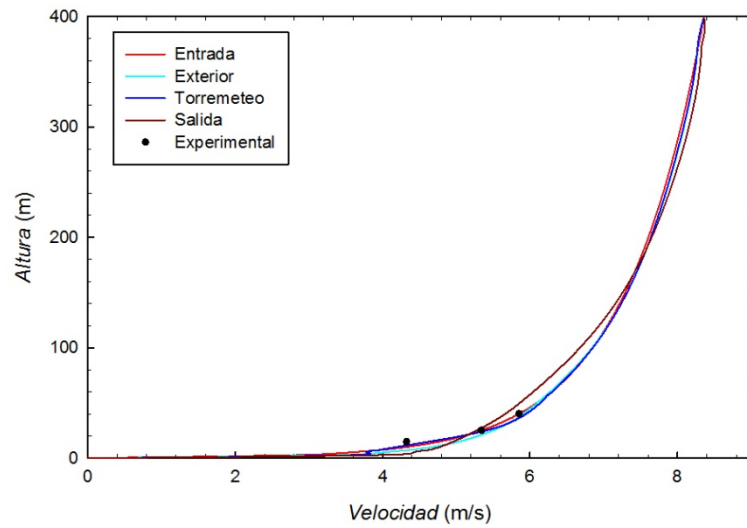


Gráfico 31. Perfiles de velocidad característicos del caso 4 (22/10/2012).

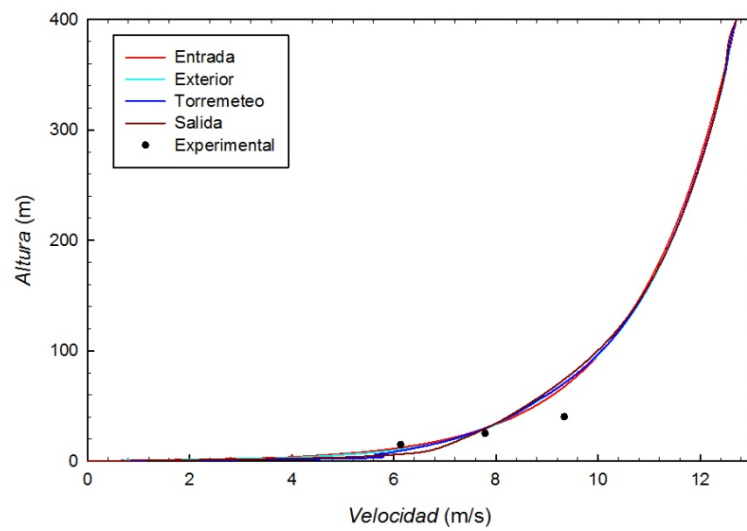


Gráfico 32. Perfiles de velocidad característicos del caso 5 (11/01/13).

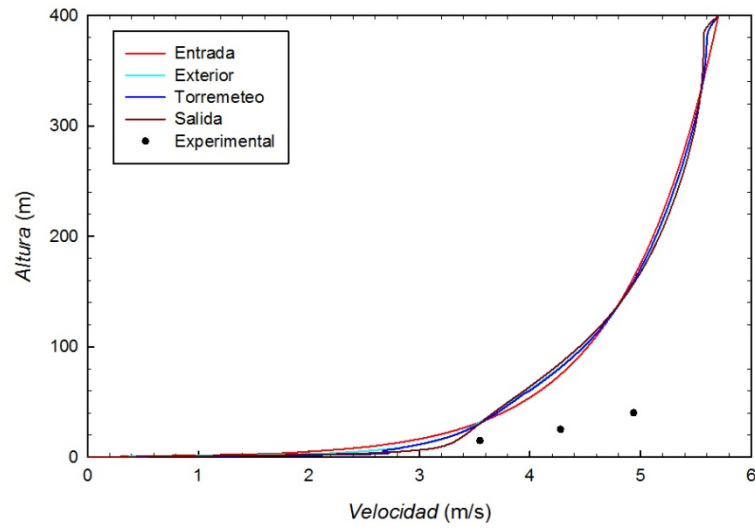


Gráfico 33. Perfiles de velocidad característicos del caso 6 (14/02/13).

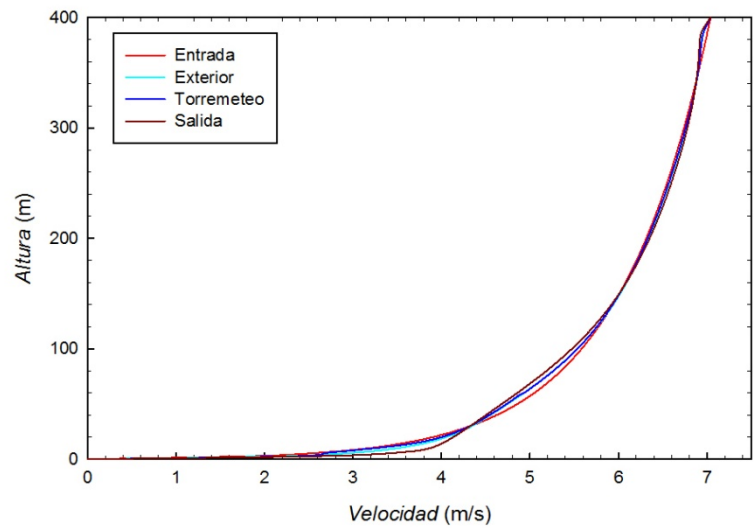


Gráfico 34. Perfiles de velocidad característicos del caso 7 (26/02/13).

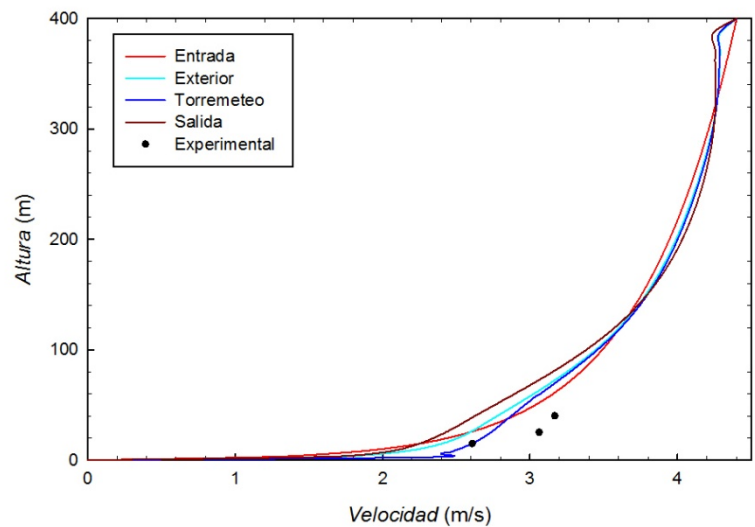


Gráfico 35. Perfiles de velocidad característicos del caso 8 (22/03/13).

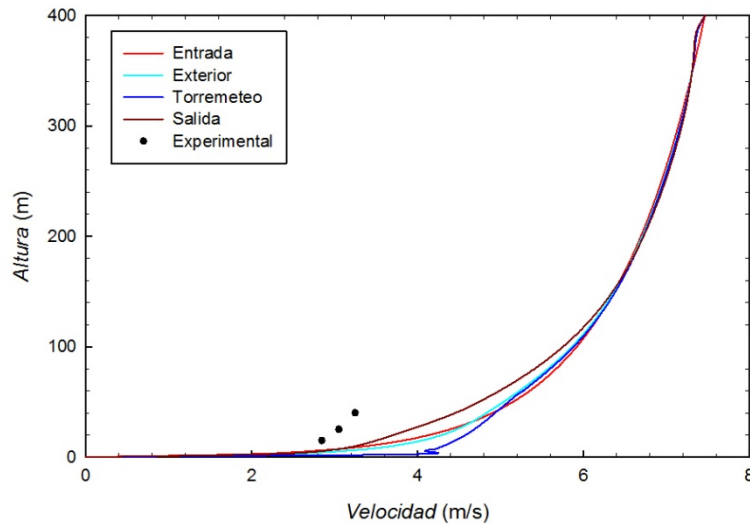


Gráfico 36. Perfiles de velocidad característicos del caso 9 (07/06/13).

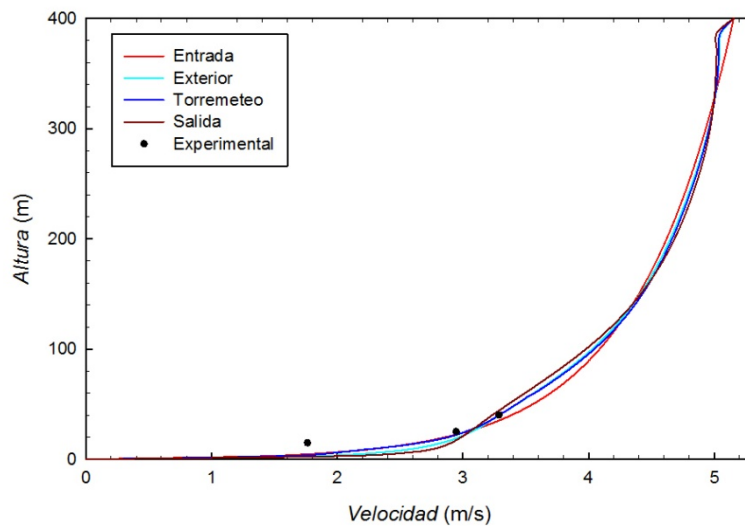


Gráfico 37. Perfiles de velocidad característicos del caso 10 (13/06/13).

Tras ver los perfiles de velocidad de cada uno de los 10 casos simulados se llega a la conclusión de que se consigue la homogeneidad horizontal de la capa límite viscosa en todas las simulaciones, además de que ningún caso presenta una deformación excesiva de ningún perfil de velocidad respecto al de entrada; por lo que se puede concluir que la capa límite viscosa está correctamente simulada en cada uno de los casos. También se observa que en los casos 2, 8 y 9 se produce una pequeña recirculación en el perfil “Torre meteorológica” debido a la presencia de edificios, lo cual puede influir en la deposición.

En cuanto a las medidas experimentales de velocidad, el caso 4 (22/10/12) fue el único que se simuló con el perfil de velocidad obtenido de la torre de medición meteorológica como condición de contorno, prueba de ello es que el perfil contenga las tres velocidades medidas experimentalmente. Una forma de cuantificar analíticamente las diferencias entre resultados numéricos y experimentales es mediante la rugosidad aerodinámica del terreno z_0 , ya que en los casos en que el perfil se halló a partir de los datos de la torre meteorológica (todos los casos excepto el 4) se tiene $z_0=0.5$ m, mientras que en el perfil hallado a partir de las medidas

experimentales se hallaba el valor de z_0 mediante una correlación (ver sección 3.4). Con lo que se tiene: para el caso 5 (11/01/13) $z_0=2.36$ m, para el caso 6 (14/02/13) $z_0=1.49$ m, para el caso 8 (22/03/13) $z_0=0.15$ m, para el caso 9 (07/06/13) $z_0=0.02$ m, y para el caso 10 (13/06/13) $z_0=0.43$ m; todos ellos valores cercanos al numérico $z_0=0.5$ m, excepto el caso 9, que tiene un valor de z_0 25 veces menor al que tiene el perfil de velocidad obtenido mediante el modelo numérico, detalle que se observa en el gráfico 36, donde las velocidades obtenidas experimentalmente quedan alejadas del perfil obtenido numéricamente. Aún así, en ninguna simulación las velocidades experimentales y numéricas distan más de 1 m/s entre sí.

4.4.3. Capa límite térmica

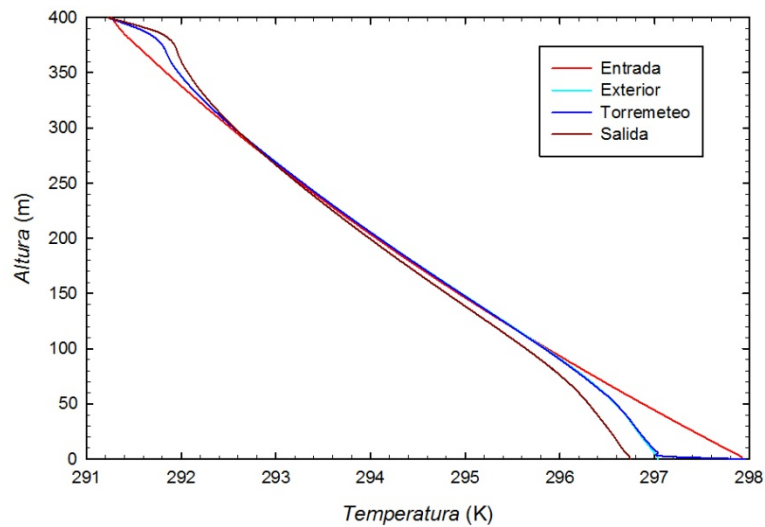


Gráfico 38. Perfiles de temperatura característicos del caso 1 (18/06/12).

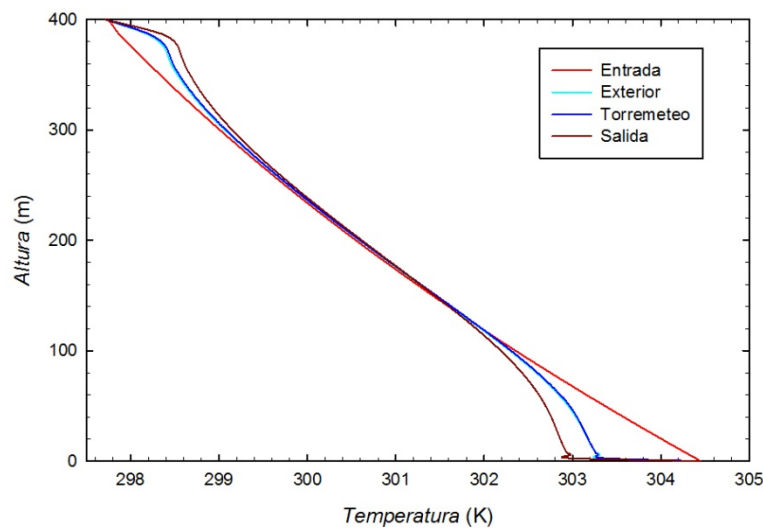


Gráfico 39. Perfiles de temperatura característicos del caso 2 (31/07/12).

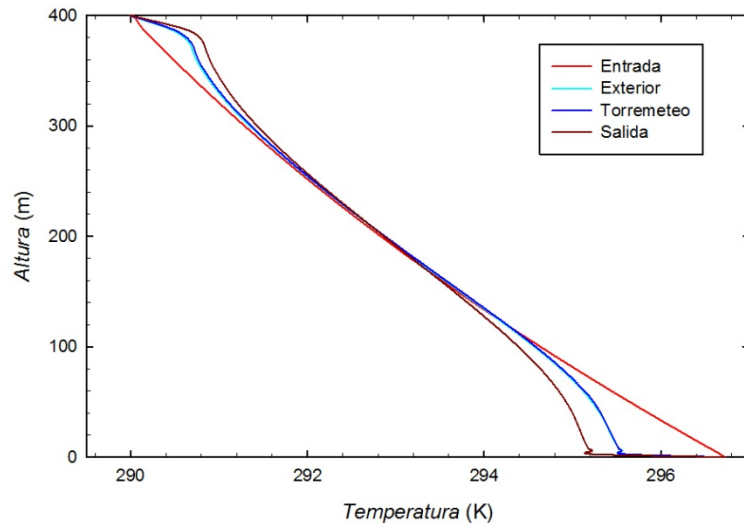


Gráfico 40. Perfiles de temperatura característicos del caso 3 (02/10/12).

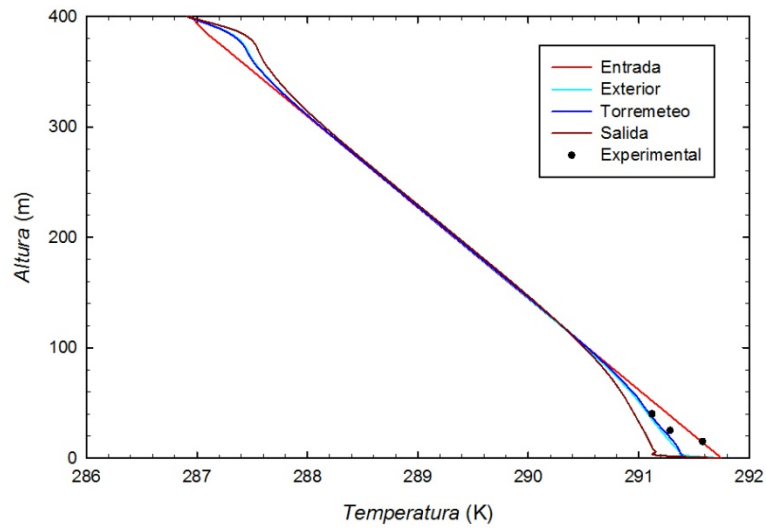


Gráfico 41. Perfiles de temperatura característicos del caso 4 (22/10/12).

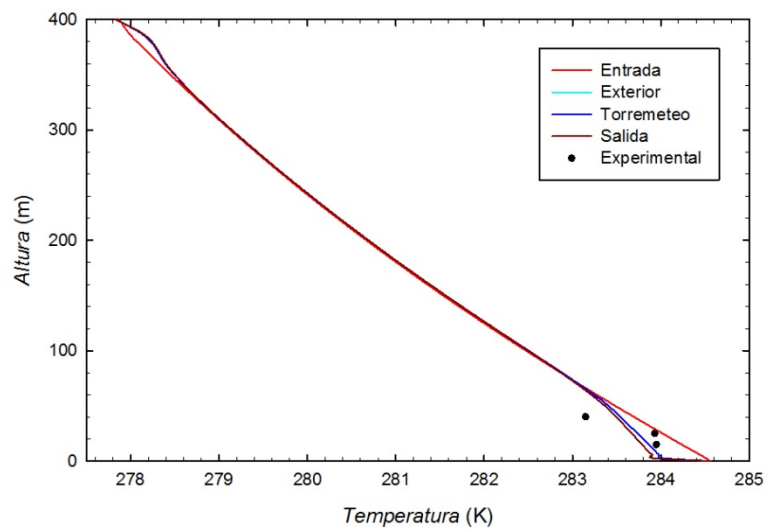


Gráfico 42. Perfiles de temperatura característicos del caso 5 (11/01/13).

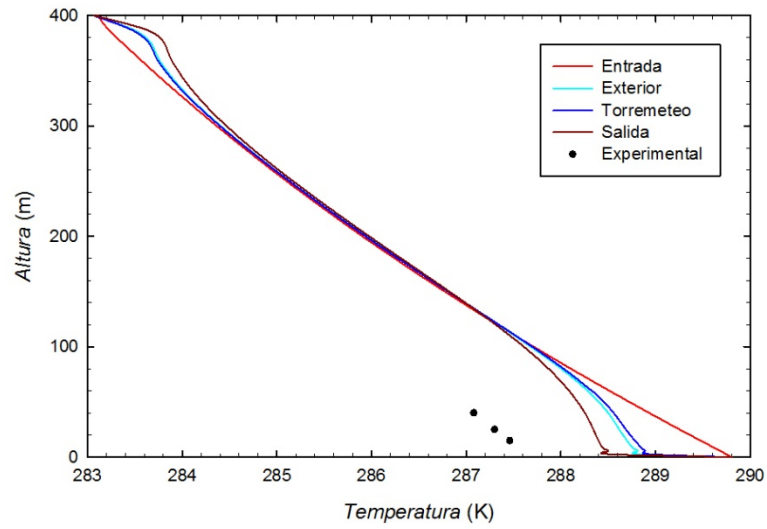


Gráfico 43. Perfiles de temperatura característicos del caso 6 (14/02/13).

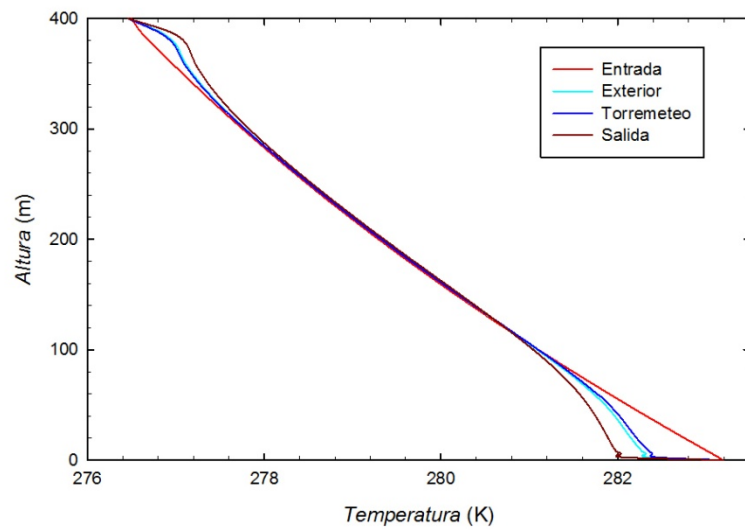


Gráfico 44. Perfiles de temperatura característicos del caso 7 (26/02/13).

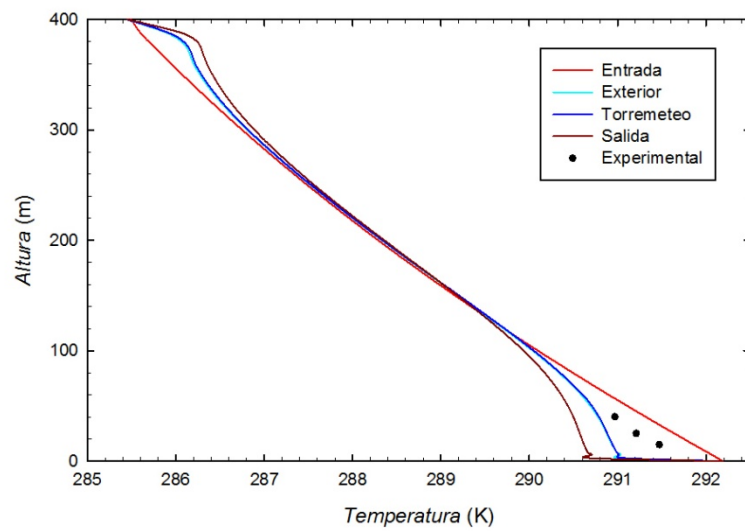


Gráfico 45. Perfiles de temperatura característicos del caso 8 (22/03/13).

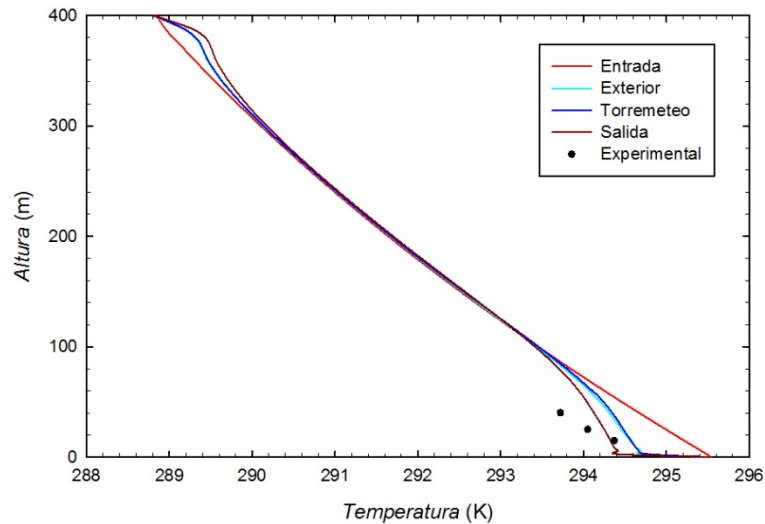


Gráfico 46. Perfiles de temperatura característicos del caso 9 (07/06/13).

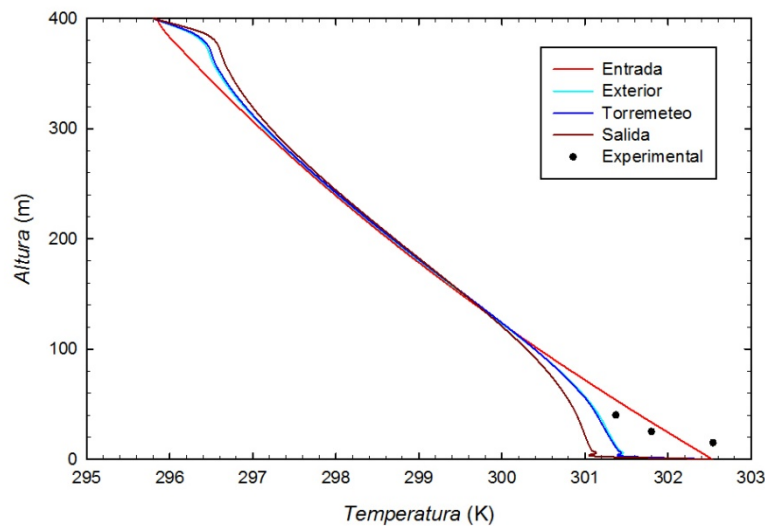


Gráfico 47. Perfiles de velocidad característicos del caso 10 (13/06/13).

A partir de las 10 gráficas anteriores se puede concluir que en cada una de las simulaciones se consigue la homogeneidad horizontal de la capa límite térmica. Tampoco se observa ninguna deformación anómala del perfil de temperaturas respecto al de entrada en ninguno de los casos, tan sólo se aprecia la bajada de temperatura del aire conforme avanza el perfil por el dominio (por la razón explicada en la sección 4.4.1). Es interesante destacar que en todos los casos se aprecia un ligero repunte en la temperatura a una altura muy baja, posiblemente ocasionado por recirculaciones del aire debido a los edificios. Los datos experimentales se acoplan bastante bien al perfil, excepto en el caso 6, donde la temperatura experimental es aproximadamente un grado menor a la numérico, producido posiblemente por fluctuaciones de la temperatura atmosférica mientras se realizaba la toma de datos mediante la torre de medición meteorológica.

4.4.4. Fase discreta: deposición y VMD.

A continuación se presentarán las gráficas de deposición frente a distancia y la tabla con el resumen del VMD de cada caso. Antes de comenzar es necesario definir un

parámetro característico de cada caso: la dirección principal, la dirección principal de cada caso es la dirección del viento en el modelo numérico,

•Caso 1: 18/06/2012

Para este ensayo con condiciones de verano (24.58°C) y viento fuerte (3.09 m/s), se colocaron 15 papelillos hidrosensibles, repartidos en 6 líneas de deposición. La dirección principal es 254.29°. Los resultados obtenidos son los siguientes:

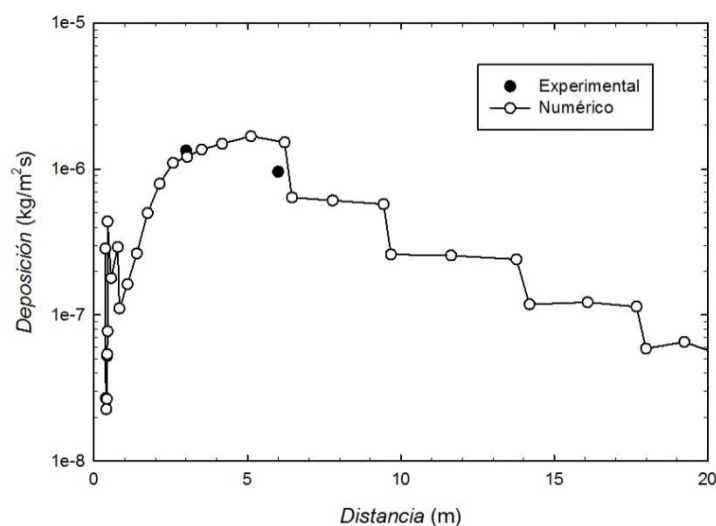


Gráfico 48. Línea de deposición c243 del caso 1 (18/06/12).

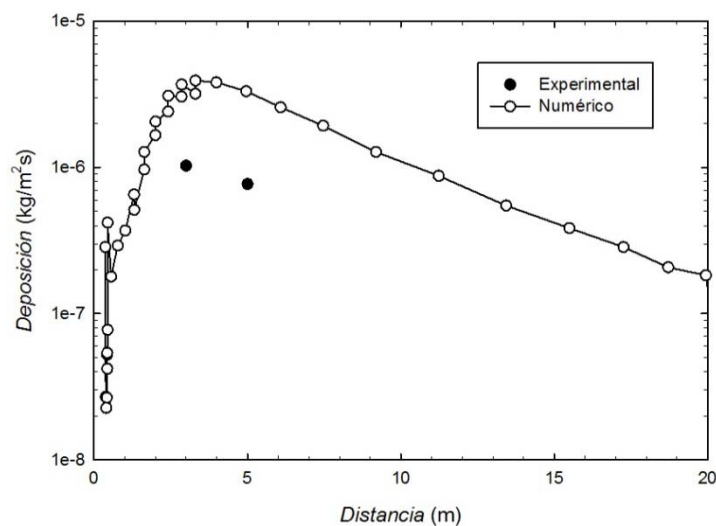


Gráfico 49. Línea de deposición c258 del caso 1 (18/06/12).

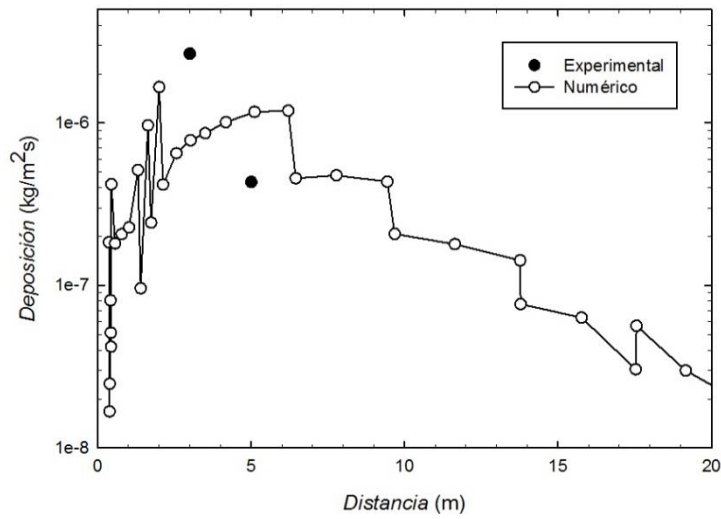


Gráfico 50. Línea de deposición c273 del caso 1 (18/06/12).

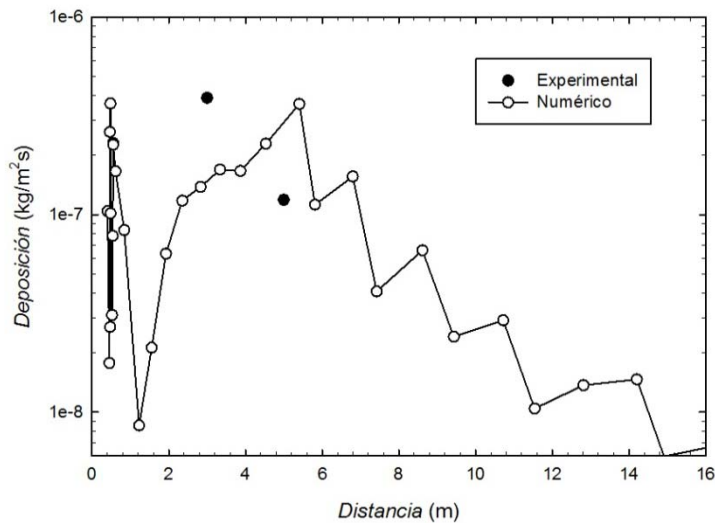


Gráfico 51. Línea de deposición c288 del caso 1 (18/06/12).

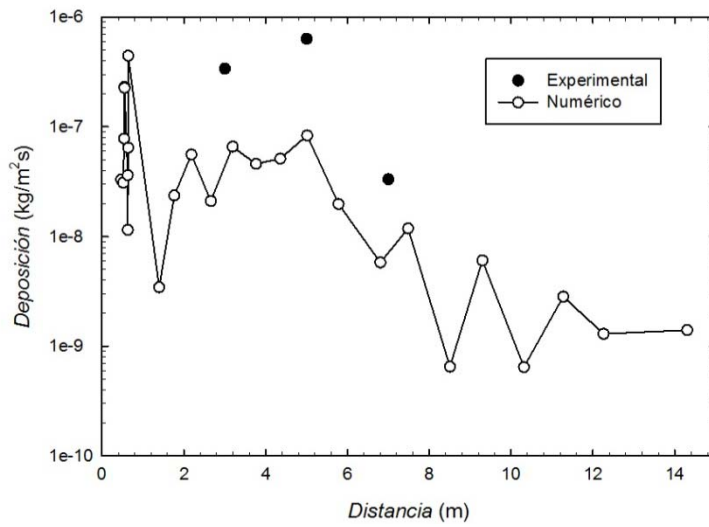


Gráfico 52. Línea de deposición c303 del caso 1 (18/06/12).

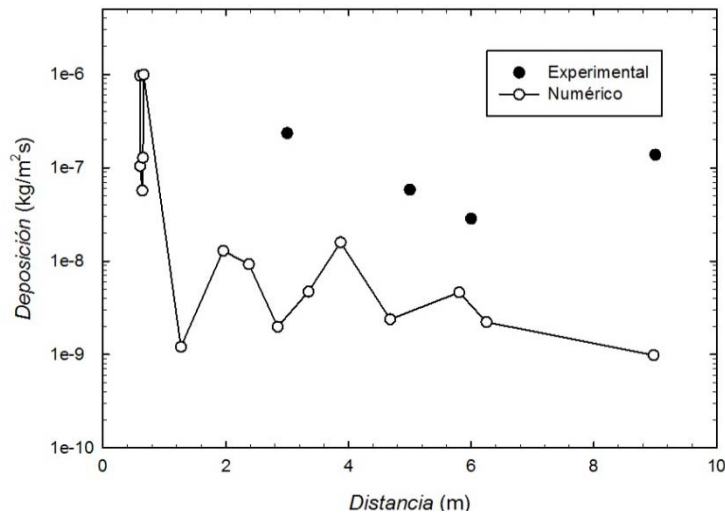


Gráfico 53. Línea de deposición c318 del caso 1 (18/06/12).

Tabla 6. Resumen VMD del caso 1 (02/10/12).

Papelillo	Medidas experimentales VMD (mm)	Modelo numérico VMD(mm)	Gotas
C243D3	0.4032	0.5240	1870
C243D6	0.3332	0.2883	347
C258D3	0.4091	0.5308	3559
C258D5	0.3538	0.3479	1257
C273D3	0.7763	0.5207	1269
C273D5	0.3166	0.3343	454
C288D3	0.3803	0.3902	133
C288D5	0.2275	0.2998	61
C303D3	0.4134	0.3254	9
C303D5	0.2769	0.2157	10
C303D7	0.2197	0.0529	2
C318D3	0.3407	0.0000	0
C318D5	0.2325	0.0000	0
C318D6	0.1185	0.0192	1
C318D9	0.5064	0.0000	0

Tras analizar las gráficas de deposición y el VMD se pueden extraer varias conclusiones:

- La dirección principal es 254.29°, a causa de ello, la línea con más deposición del modelo numérico es la línea c258. Los resultados de deposición se ajustan bastante bien a los experimentales en la mayoría de las líneas de deposición. El problema llega en las líneas c303 y c318, donde en el modelo numérico no hay apenas deposición, pero las medidas experimentales si recogen algo de deposición. La razón de este pequeño desfase no es un error al elegir la dirección del viento para el modelo, ya que la máxima deposición experimental se encuentra aproximadamente en la misma zona que la numérica. El problema es que el modelo numérico es estacionario, por lo que el viento siempre soplará en una única dirección, pero al tomar la deposición experimental, el ensayo dura un lapso de tiempo, durante el cual, el viento no sopla en una única dirección, sino que sufre fluctuaciones de velocidad y cambios de dirección, por eso puede ocurrir que durante unos segundos del

ensayo el viento varíe su dirección y deposite algunas gotas en los papeles más alejados de la dirección principal. Hay dos evidencias que muestran que la deposición en las líneas c303 y c318 son debidas a cortas fluctuaciones en la dirección del viento: en las líneas c303 y c318 la deposición experimental es aproximadamente 10 veces menor a la del resto de líneas, por otro lado la zona de máxima deposición es la de las líneas c243, c258 y c273, sin embargo, la siguiente línea (c288) tiene menos deposición que la c303, lo que significa que la deposición en c303 se ha debido a una fuerte fluctuación del viento.

- Si se compara la deposición frente a la distancia en cada línea, se observa que la máxima deposición en el modelo numérico ocurre aproximadamente a una distancia de entre 3 y 5 m, y que conforme aumenta a la distancia a la chimenea la deposición va disminuyendo, los datos experimentales tienen un comportamiento similar al numérico, mostrando diferencias significativas sólo en las líneas c303 y c318, donde la deposición experimental es mayor que la numérica por las razones anteriormente comentadas. Por lo que los resultados de deposición numérica siguen la misma tendencia que los experimentales.
- En cuanto al diámetro de las gotas que caen en cada papelillo, se puede observar que para las líneas c303 y c318 no caen suficientes gotas en el modelo numérico, debido al tema de las fluctuaciones del viento durante el ensayo de arrastre. Para el resto de líneas, el VMD numérico es similar al experimental, es decir: las gotas que caen en los papelillos tienen diámetros similares a los experimentales. Tan sólo hay una pequeña diferencia: en el modelo numérico, las gotas más grandes caen a una distancia de 3 metros de la torre, en la zona comprendida entre las líneas c243 y c258, mientras que los datos experimentales muestran que las gotas más grandes caen a 3 metros de la torre, pero en la zona de la línea c273

Para este caso, la predicción del modelo numérico sobre la deposición y tamaños de deposición de la fase discreta es bastante eficaz, excepto para las zonas más alejadas de la dirección principal, donde los resultados del modelo numérico son inferiores a los experimentales, ya que la simulación no contempla que el viento pueda correr en direcciones diferentes a la dirección promedio.

•Caso 2: 31/07/2012

En este caso de verano (31.07°C) y con velocidad del viento baja (2.15 m/s), se colocaron 16 papelillos repartidos en 5 líneas de deposición. La dirección principal es 306.83°. Los resultados de la fase discreta son los siguientes:

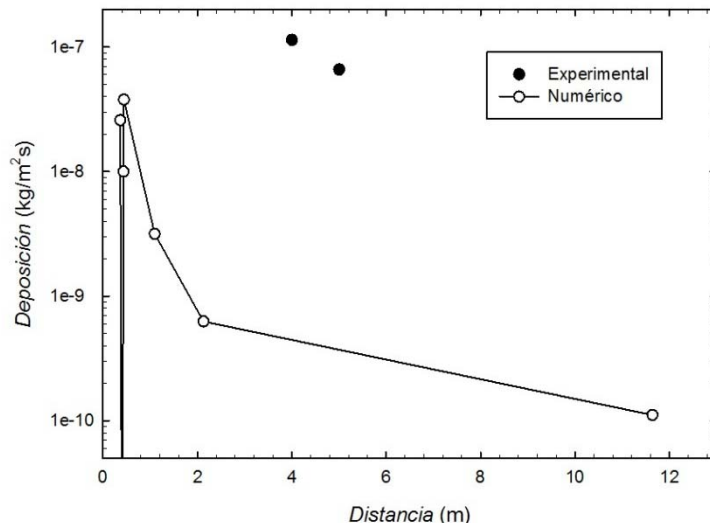


Gráfico 54. Línea de deposición c243 del caso 2 (31/07/12).

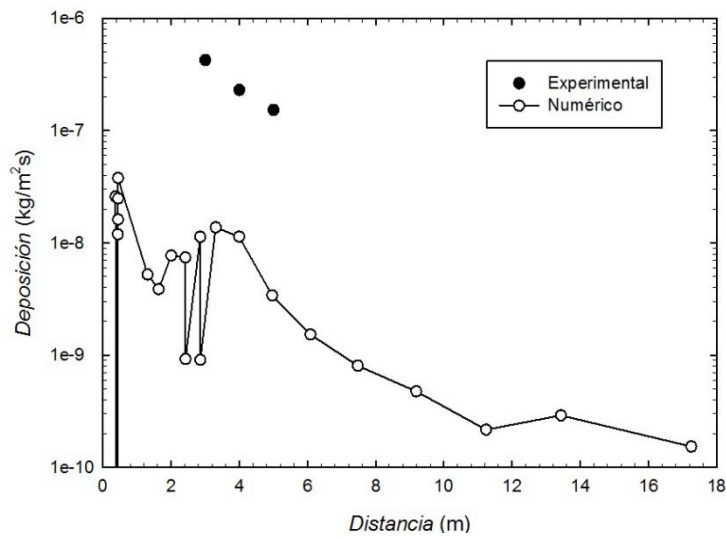


Gráfico 55. Línea de deposición c258 del caso 2 (31/07/12).

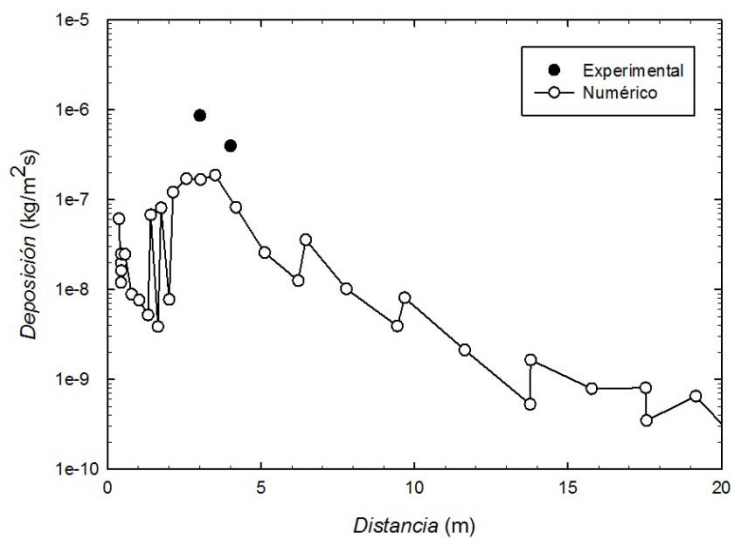


Gráfico 56. Línea de deposición c273 del caso 2 (31/07/12).

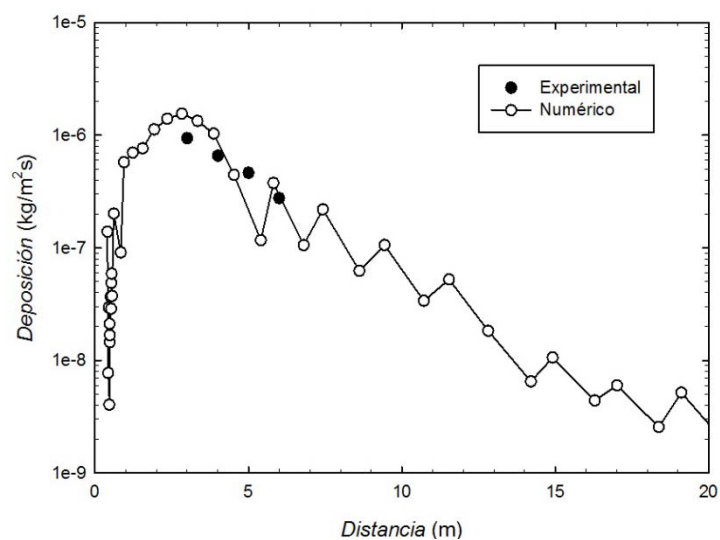


Gráfico 57. Línea de deposición c288 del caso 2 (31/07/12).

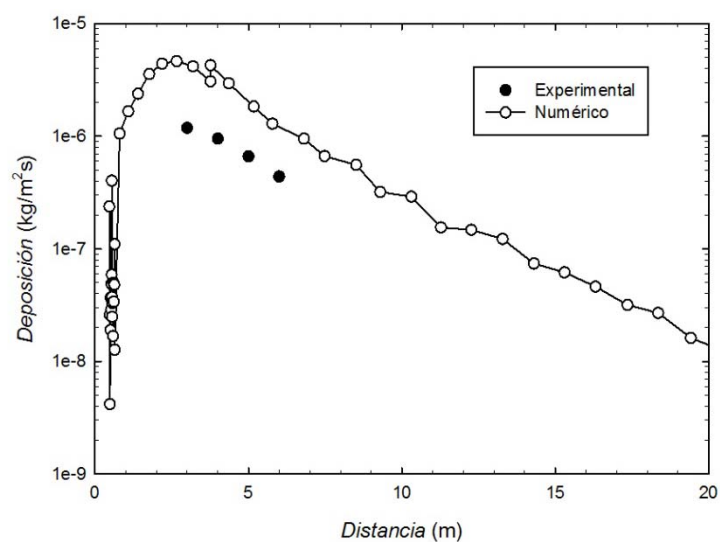


Gráfico 58. Línea de deposición c303 del caso 2 (31/07/12).

Tabla 7. Resumen VMD del caso 2 (31/07/12).

Papelillo	Medidas experimentales VMD (mm)	Modelo numérico VMD(mm)	Gotas
C243D3	0.3329	0.0000	0
C243D4	0.3073	0.0000	0
C243D5	0.2641	0.0000	0
C258D3	0.3682	0.3186	3
C258D4	0.3451	0.1451	1
C258D5	0.2862	0.1100	1
C273D3	0.4333	0.5583	36
C273D4	0.3118	0.4645	27
C288D3	0.4385	0.5972	621
C288D4	0.3733	0.4907	383
C288D5	0.3334	0.4053	219
C288D6	0.2972	0.3457	137
C303D3	0.48	0.5246	3193
C303D4	0.4294	0.4438	1780
C303D5	0.3662	0.3696	1066
C303D6	0.3319	0.3168	684

Las conclusiones que se extraen tras analizar los resultados de esta simulación, y compararlos con los experimentales son las siguientes:

- Nuevamente se aprecia que hay dos líneas de deposición c243 y c258 donde la deposición numérica es casi inexistente, mientras que en el ensayo experimental sí se recogió deposición en dichas líneas, la razón de esto es la misma que en el caso anterior: ligeras fluctuaciones del viento, produciendo ráfagas transitorias con dirección diferente a la dirección principal, que arrastran las gotas hasta las líneas de deposición más alejadas la dirección principal. La dirección elegida del viento en el modelo es 306.83° , en las líneas próximas a esta dirección (c303 y c288) la concordancia entre los datos experimentales y numéricos es muy buena, en la línea c273 ya empieza a ser mayor la deposición experimental que la numérica, y en las líneas c243 y c258 la deposición experimental es mucho mayor que la numérica. Aún así, se puede comprobar que en la línea c243 los valores de deposición son mucho menores a los de las otras líneas, prueba que confirma la hipótesis de que la deposición en las líneas más alejadas de la principal es causada por fluctuaciones.
- En cuanto al estudio de la deposición frente a la distancia, en las líneas c273, c288 y c303, las cuales están próximas a la dirección principal, la concordancia entre los resultados del modelo numérico y las medidas obtenidas del ensayo experimental son casi coincidentes, mostrando una máxima deposición a una distancia de 3 ó 4 metros de la torre, deposición que va disminuyendo paulatinamente conforme aumenta la distancia a la torre. Por lo que nuevamente hay coincidencia entre la deposición obtenida a través de modelo numérico y la experimental.
- Del análisis del VMD podemos extraer algunas conclusiones, los papelillos de las líneas c243 y c258 no tienen suficientes gotas como para

considerar válido el VMD obtenido en ellas, en las otras tres líneas el VMD obtenido numéricamente es ligeramente superior al tomado experimentalmente, lo que significa que las gotas del modelo numérico llegan al suelo con mayor diámetro que las del ensayo experimental, la causa de esto podría ser la modelización de la distribución de gotas que sale de la torre como una Rosin-Rammler, en la que se hubiera puesto un diámetro medio demasiado grande; otra posible razón de que el VMD numérico sea mayor al experimental podría ser la evaporación, que sea mayor en la realidad que en el modelo, lo que provoca una disminución del tamaño de las gotas en la realidad, que no ocurre en el modelo. Aún así se observa que la variación del VMD frente a la distancia (tendencia), es muy similar en el modelo numérico y en el ensayo experimental.

Como conclusiones generales de este segundo caso se puede afirmar que los resultados de deposición del modelo numérico son fiables en la zona de de la línea de deposición alineada con la dirección principal, pero la deposición en las líneas alejadas más de 50° de la línea principal no puede considerarse como válida. Los resultados de VMD en las líneas cercanas a la principal son un poco superiores a los experimentales, pero aún así no se alejan mucho de ellos.

•Caso 3: 02/10/2012

Para este caso de verano (23.35°C) y con velocidad baja (2.05m/s) se colocaron 20 papeles hidrosensibles, repartidos en 7 líneas de deposición. La dirección del viento promedio (dirección principal) es de 313.43°. Los resultados de deposición y VMD son los siguientes:

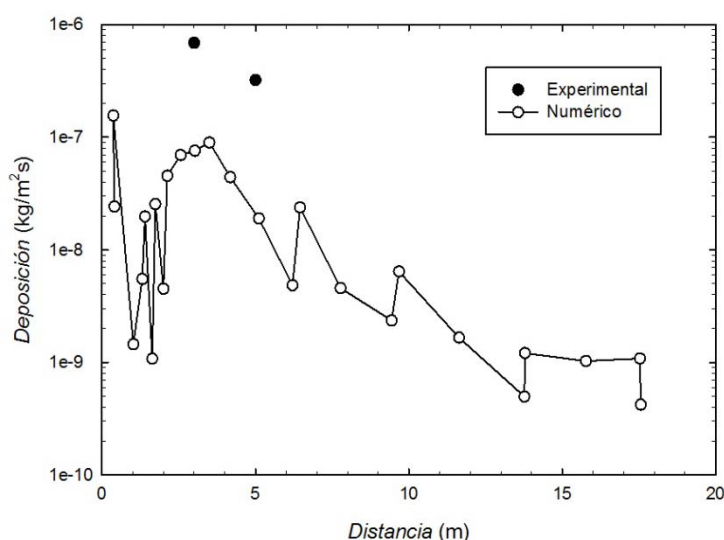


Gráfico 59. Línea de deposición c273 del caso 3 (02/10/12).

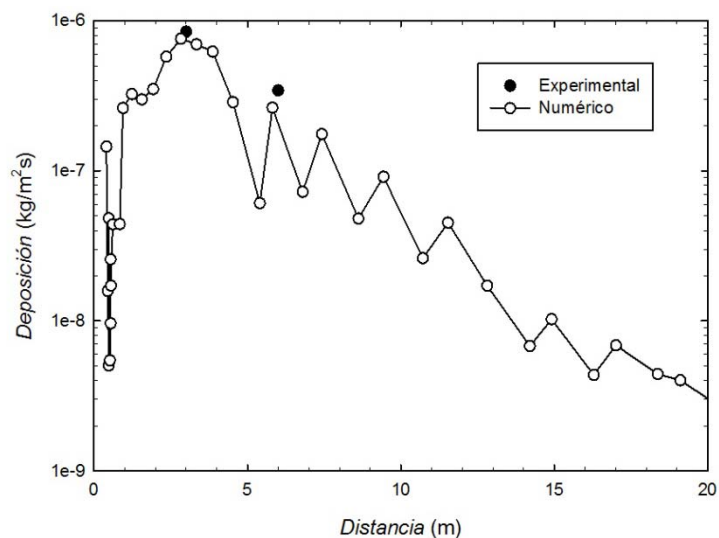


Gráfico 60. Línea de deposición c288 del caso 3 (02/10/12).

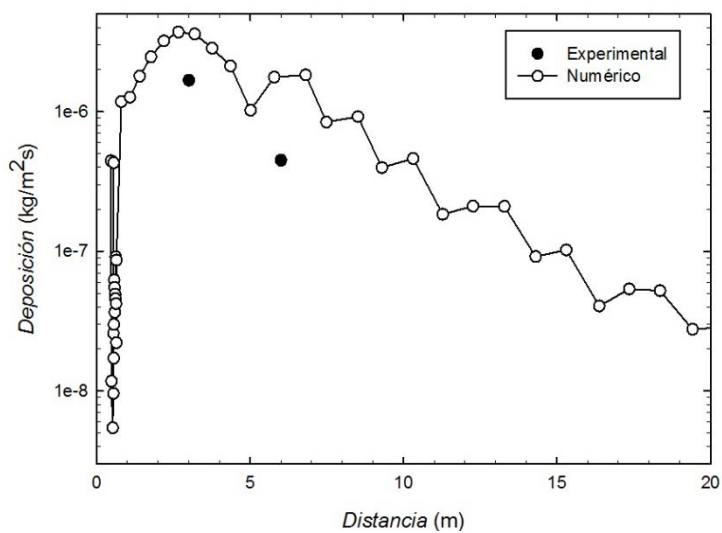


Gráfico 61. Línea de deposición c303 del caso 3 (02/10/12).

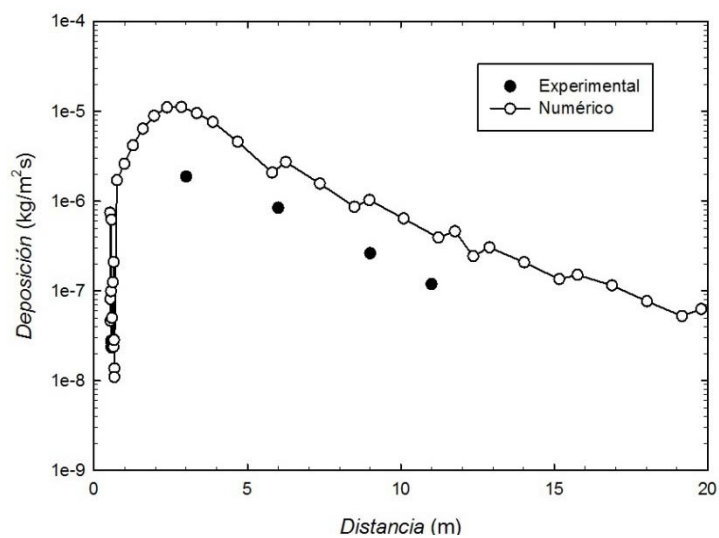


Gráfico 62. Línea de deposición c318 del caso 3 (02/10/12).

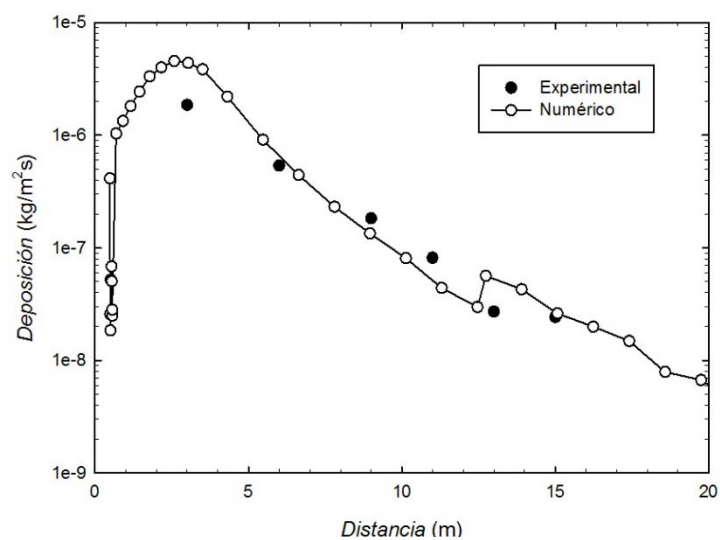


Gráfico 63. Línea de deposición c333 del caso 3 (02/10/12).

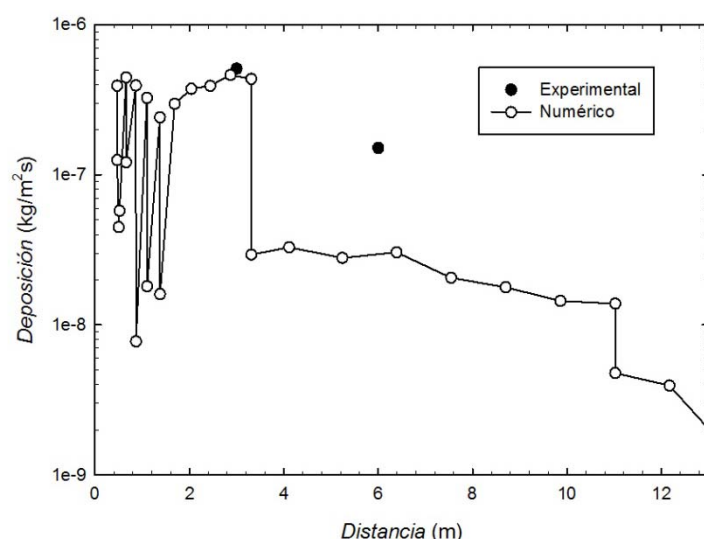


Gráfico 64. Línea de deposición c348 del caso 3 (02/10/12).

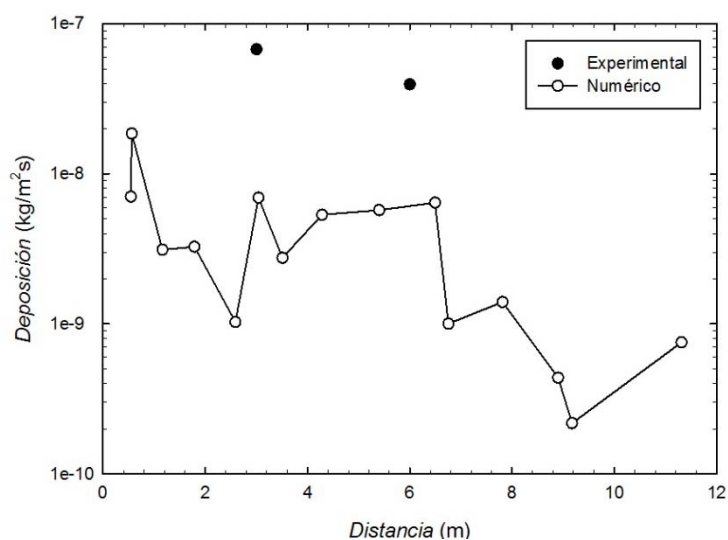


Gráfico 65. Línea de deposición c3 del caso 3 (02/10/12).

Tabla 8. Resumen VMD del caso 3 (02/10/12).

Papelillo	Medidas experimentales VMD (mm)	Modelo numérico VMD(mm)	Gotas
C273D3	0.4036	0.3362	8
C273D5	0.3334	0.2471	6
C288D3	0.4057	0.5532	379
C288D6	0.3038	0.3343	70
C303D3	0.4498	0.5360	4218
C303D6	0.3126	0.3307	550
C318D3	0.4518	0.4905	6482
C318D6	0.3353	0.3112	909
C318D9	0.2527	0.2198	296
C318D11	0.2054	0.2028	168
C333D3	0.5119	0.5064	1254
C333D6	0.3172	0.3206	186
C333D9	0.2338	0.2322	49
C333D11	0.2196	0.2395	23
C333D13	0.173	0.1992	15
C333D15	0.151	0.2172	9
C348D3	0.4555	0.3984	62
C348D6	0.3136	0.2469	14
C3D3	0.3023	0.1924	4
C3D6	0.2513	0.0000	0

Se observa que los resultados obtenidos a través del modelo numérico, tanto la deposición como en VMD son muy similares a la realidad. En las líneas c273, c348 y c3, que son las más alejadas de la dirección principal (313.43º) la deposición es menor a la experimental y el VMD no se puede calcular por falta de gotas en el papel, la razón es la misma que en los casos anteriores, las fluctuaciones de viento durante el ensayo. También es importante remarcar que en las líneas c288 y c318 el VMD a la distancia de 3 m es un poco mayor en el modelo numérico que en la realidad.

También es importante destacar que tanto en deposición como en VMD, la tendencia que siguen los resultados del modelo numérico son similares a los experimentales para cada línea de deposición.

•Caso 4: 22/10/2012

El caso 4 es considerado como veraniego, por tener una temperatura de 18.39ºC, la velocidad del viento es de 1.01 m/s (baja), la dirección principal es 110.26º. Para el ensayo de deposición se utilizaron 20 papeles hidrosensibles repartidos en 5 líneas de deposición. A continuación se muestran los resultados obtenidos.

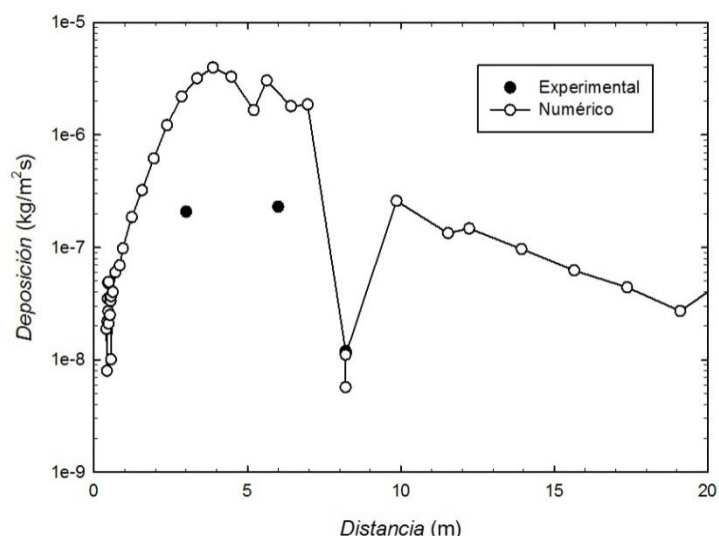


Gráfico 66. Línea de deposición c108 del caso 4 (22/10/12).

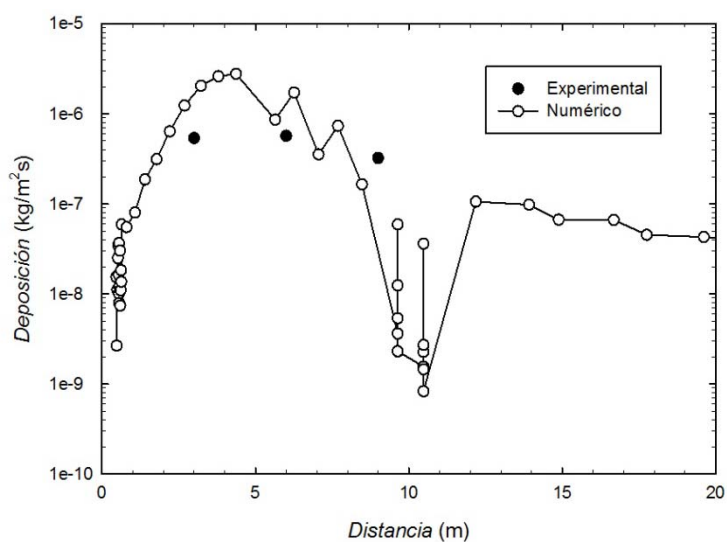


Gráfico 67. Línea de deposición c123 del caso 4 (22/10/12).

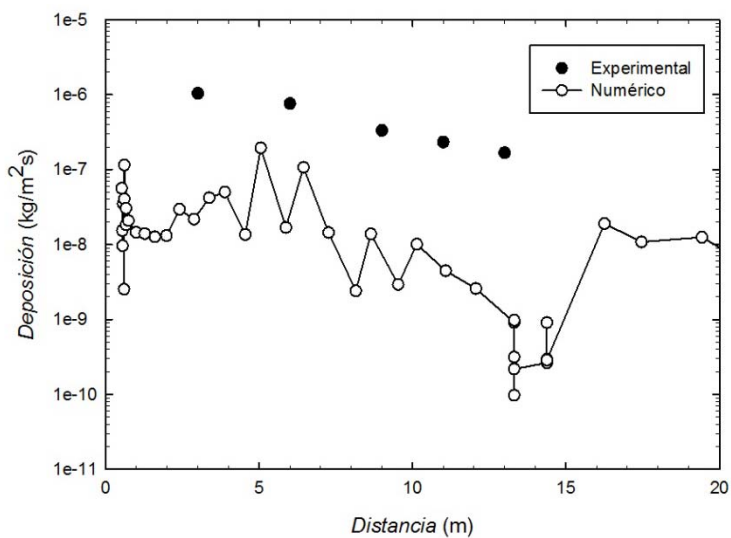


Gráfico 68. Línea de deposición c138 del caso 4 (22/10/12).

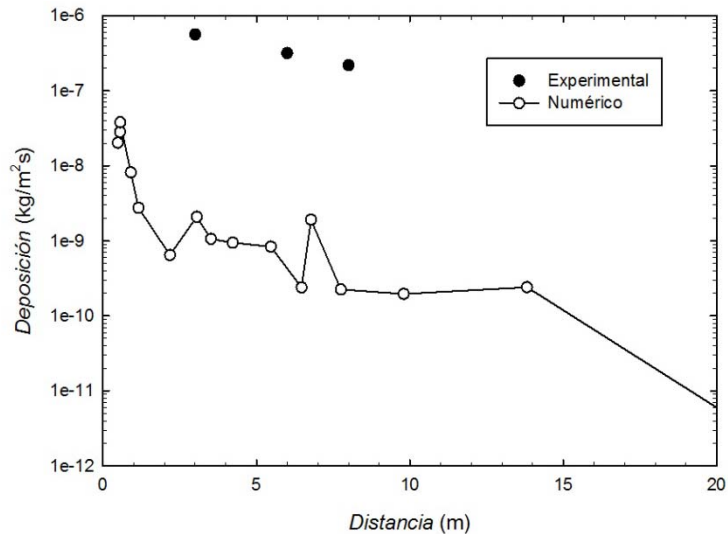


Gráfico 69. Línea de deposición c153 del caso 4 (22/10/12).

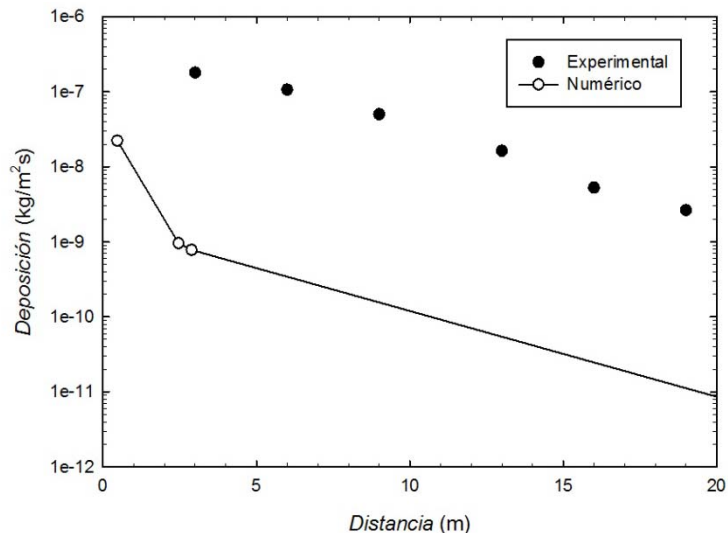


Gráfico 70. Línea de deposición c168 del caso 4 (22/10/12).

Tabla 9. Resumen VMD del caso 4 (22/10/12).

Papelillo	Medidas experimentales VMD (mm)	Modelo numérico VMD(mm)	Gotas
C108D3	0.4514	0.6879	4310
C108D6	0.3482	0.4851	3706
C123D3	0.4465	0.6491	1926
C123D6	0.3492	0.4666	1185
C123D9	0.2862	0.2969	5
C138D3	0.4848	0.4040	19
C138D6	0.3999	0.3263	21
C138D9	0.3029	0.2303	3
C138D11	0.2988	0.1455	3
C138D13	0.2774	0.0000	0
C153D3	0.4645	0.0000	0
C153D6	0.3482	0.0000	0
C153D8	0.3213	0.0000	0
C168D3	0.4513	0.0000	0
C168D6	0.3449	0.0000	0
C168D9	0.3022	0.0000	0
C168D13	0.2211	0.0000	0
D168D16	0.1812	0.0000	0
C168D19	0.0545	0.0000	0
C168D22	0.0303	0.0000	0

La interpretación de los resultados es muy similar a la de los casos anteriores: en las líneas más cercanas a la dirección principal (c108 y c123) los resultados de deposición del modelo numérico son muy similares a los experimentales, y el VMD es muy similar al experimental, aunque mayor al experimental en las cercanías de la torre de refrigeración. En las líneas c138, c153 y c168, más alejadas de la dirección principal, la deposición experimental es mayor a la numérica, así como el VMD, al igual que ocurría en el resto de casos.

•Caso 5: 11/01/2013

La dirección principal de este caso es 127.92°. El caso es considerado de invierno (11.18°C), y con velocidad alta (5.89 m/s). Los resultados obtenidos son los siguientes:

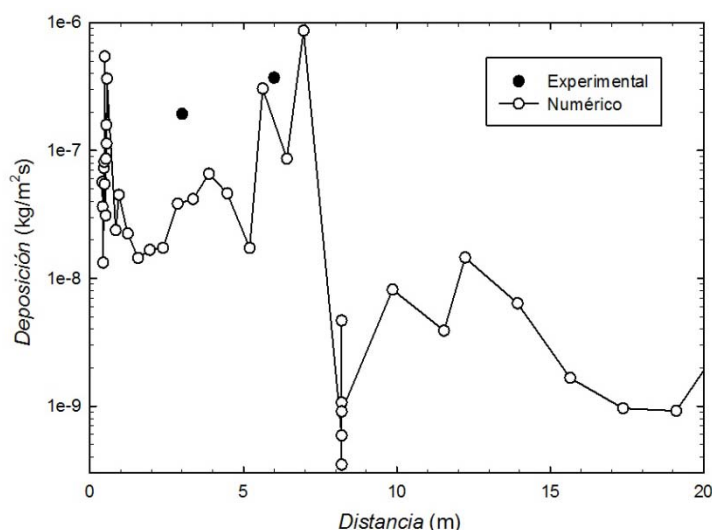


Gráfico 71. Línea de deposición c108 del caso 5 (11/01/13).

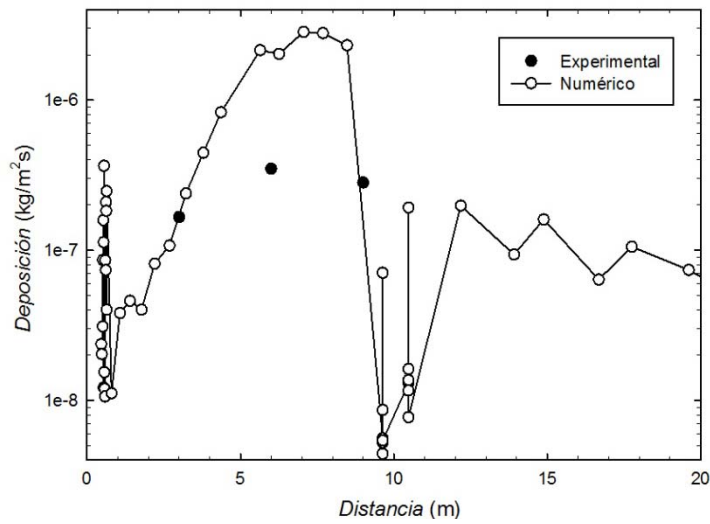


Gráfico 72. Línea de deposición c123 del caso 5 (11/01/13).

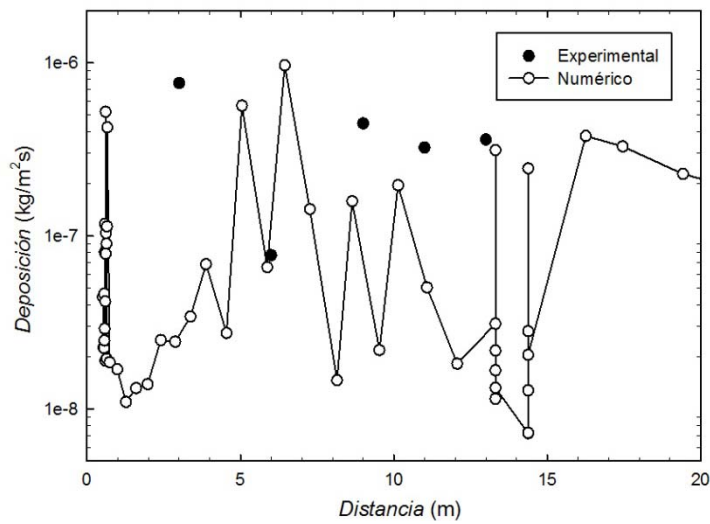


Gráfico 73. Línea de deposición c138 del caso 5 (11/01/13).

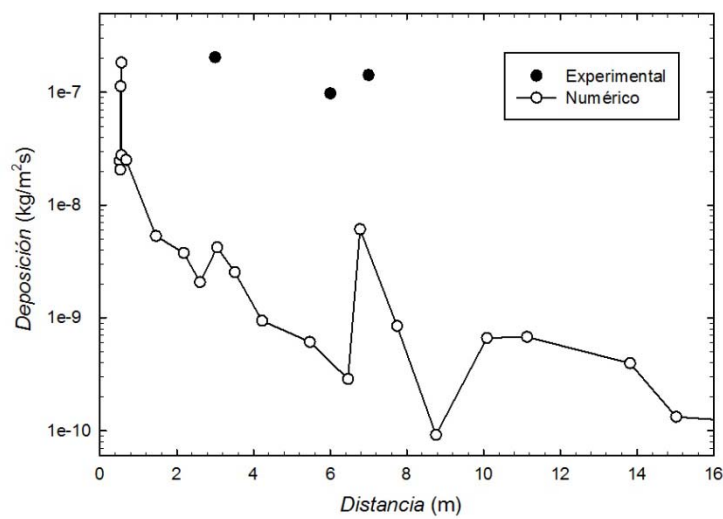


Gráfico 74. Línea de deposición c153 del caso 5 (11/01/13).

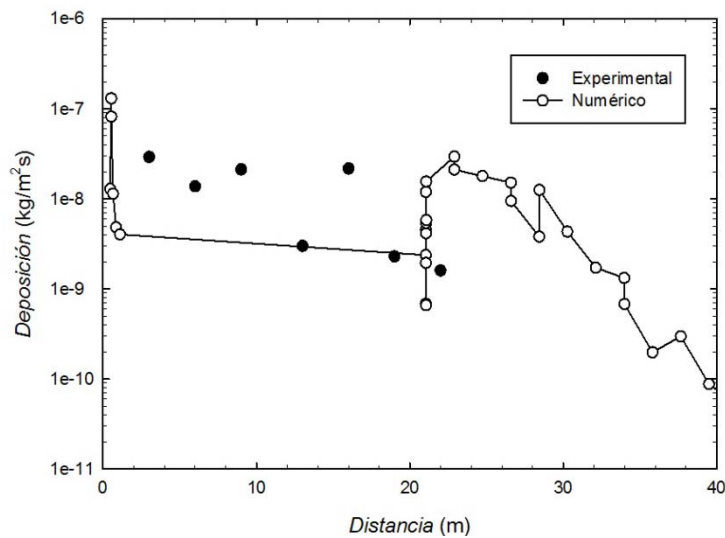


Gráfico 75. Línea de deposición c168 del caso 5 (11/01/13).

Tabla 10. Resumen VMD del caso 5 (11/01/13).

Papelillo	Medidas experimentales VMD (mm)	Modelo numérico VMD(mm)	Gotas
C108D3	0.5735	0.2450	8
C108D6	0.5087	0.5848	126
C123D3	0.4843	0.3520	169
C123D6	0.4412	0.6010	3836
C123D9	0.3747	0.5027	53
C138D3	1.1666	0.1507	12
C138D6	0.4467	0.5572	102
C138D9	0.4392	0.4063	84
C138D11	0.4202	0.4262	60
C138D13	0.4479	0.0000	0
C153D3	0.5000	0.0000	0
C153D6	0.3739	0.3173	1
C153D7	0.4499	0.0000	0
C168D3	0.4577	0.0000	0
C168D6	0.3483	0.0000	0
C168D9	0.3260	0.0000	0
C168D13	0.1438	0.0000	0
C168D16	0.4058	0.0000	0
C168D19	0.0295	0.0000	0
C168D22	0.0251	0.0000	0

La interpretación de los resultados de validación de este caso es similar a la de los casos anteriores, con la salvedad de que los resultados experimentales de deposición de la línea c168 (la más alejada de la dirección principal (127.92°)) coinciden con los numéricos, ambos con una deposición muy baja, esto es debido a que en el ensayo de arrastre de ese día no hubo apenas fluctuaciones en la dirección del viento.

•Caso 6: 14/02/2013

El caso 6 es considerado como primaveral, por tener una temperatura de 16.42°C, su velocidad es baja (2.64 m/s). La dirección principal de este caso es 132.40°. Para el ensayo de deposición de este caso se usaron 20 papelillos hidrosensibles, repartidos en 5 líneas de deposición. Los resultados obtenidos se muestran a continuación.

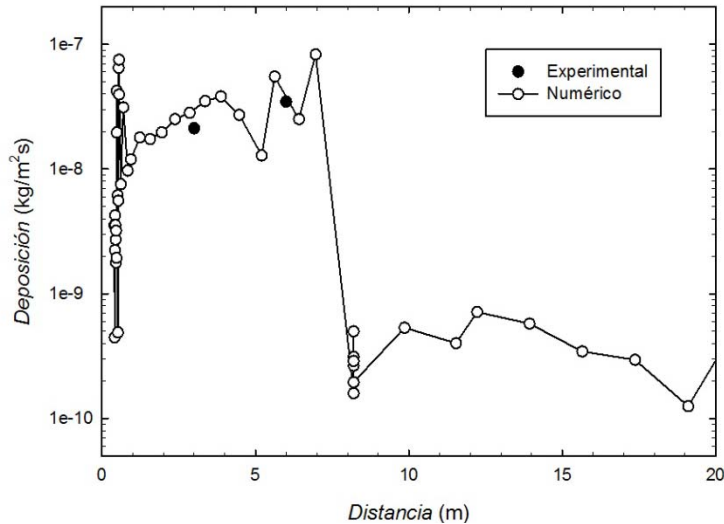


Gráfico 76. Línea de deposición c108 del caso 6 (14/02/13).

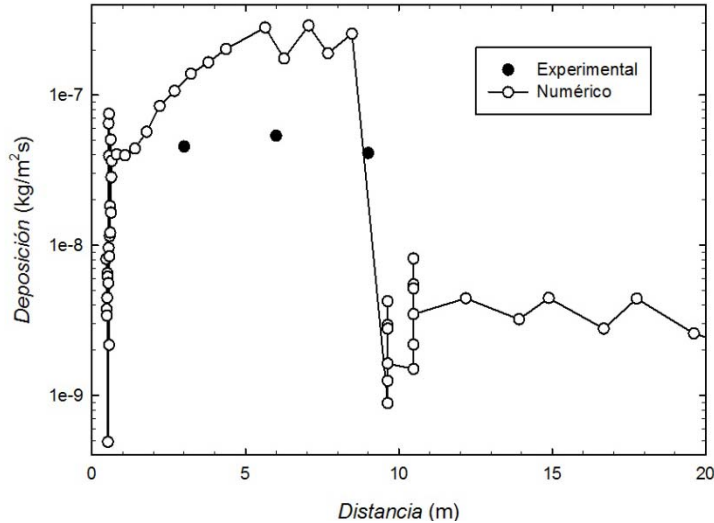


Gráfico 77. Línea de deposición c123 del caso 6 (14/02/13).

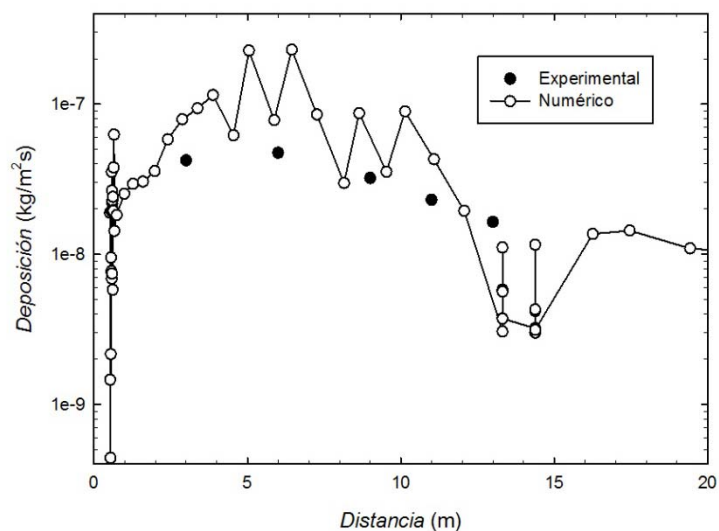


Gráfico 78. Línea de deposición c138 del caso 6 (14/02/13).

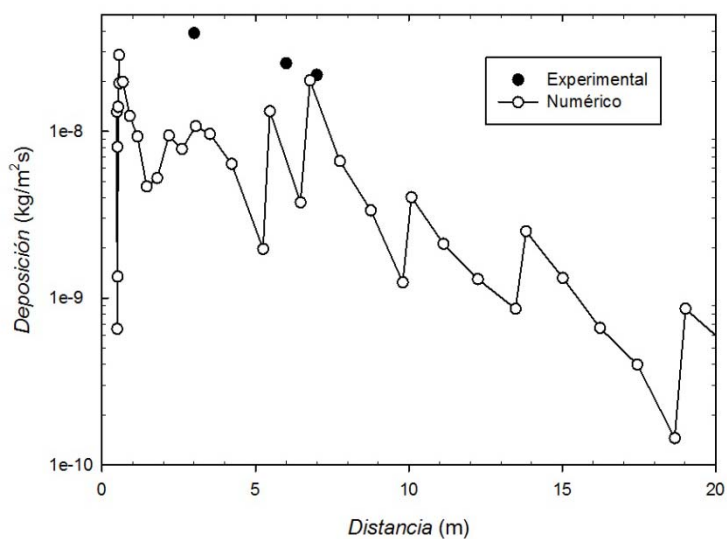


Gráfico 79. Línea de deposición c153 del caso 6 (14/02/13).

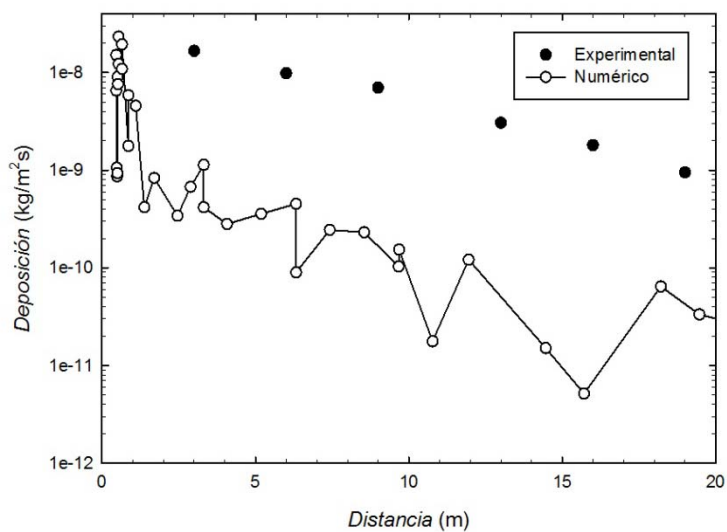


Gráfico 80. Línea de deposición c168 del caso 6 (14/02/13).

Tabla 11. Resumen VMD del caso 6 (14/02/13).

Papelillo	Medidas experimentales VMD (mm)	Modelo numérico VMD(mm)	Gotas
C108D3	0.3837	0.3016	239
C108D6	0.3324	0.2803	298
C123D3	0.3931	0.3194	2705
C123D6	0.3083	0.2641	2691
C123D9	0.2586	0.2470	25
C138D3	0.3351	0.3521	970
C138D6	0.3021	0.2872	1061
C138D9	0.2448	0.2243	376
C138D11	0.2444	0.2109	166
C138D13	0.2022	0.0000	0
C153D3	0.3627	0.3121	26
C153D6	0.2666	0.3148	37
C153D7	0.2837	0.1413	21
C168D3	0.2807	0.1966	1
C168D6	0.3004	0.2320	1
C168D9	0.2464	0.0000	0
C168D13	0.1548	0.0000	0
C168D16	0.0825	0.0000	0
C168D19	0.0694	0.0000	0
C168D22	0.0859	0.0000	0

Nuevamente los resultados del modelo numérico son similares a los experimentales en las líneas cercanas de la dirección principal, pero en la línea más lejana c168, la deposición experimental es mayor a la numérica, debido a las ligeras fluctuaciones del viento. Algo similar ocurre con el VMD, que es similar al experimental en las líneas c108, c123, c138 y c153, pero que no se puede calcular en la línea más alejada de la dirección principal (c168), por falta de gotas.

•Caso 7: 26/02/2013

La dirección principal es 143.49°, el caso es considerado invernal (9.81°C), y con velocidad alta (3.26 m/s). Se usaron 16 papelillos repartidos en 4 líneas de deposición. A continuación se presentan los resultados de deposición y VMD obtenidos.

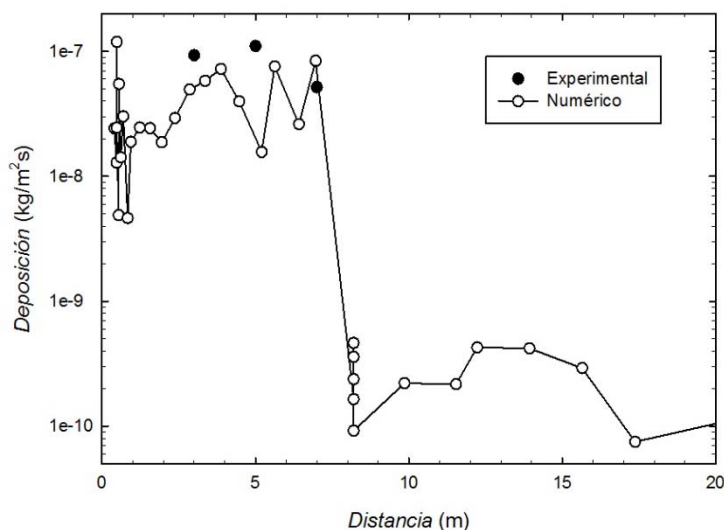


Gráfico 81. Línea de deposición c108 del caso 7 (26/02/13).

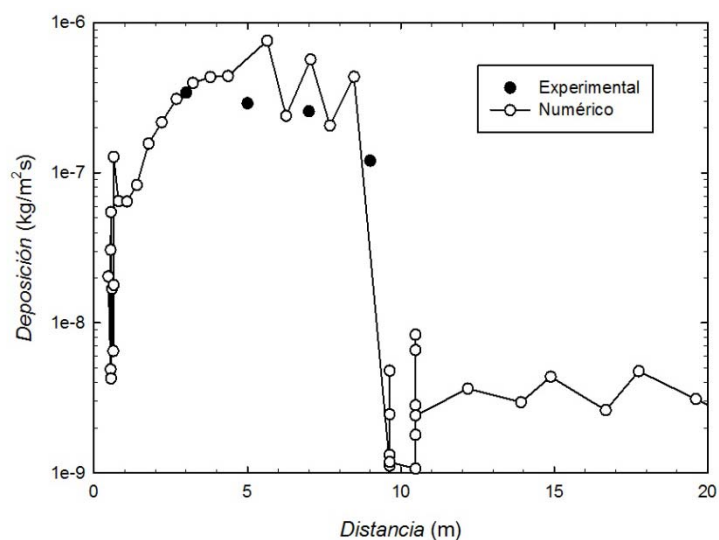


Gráfico 82. Línea de deposición c123 del caso 7 (26/02/13).

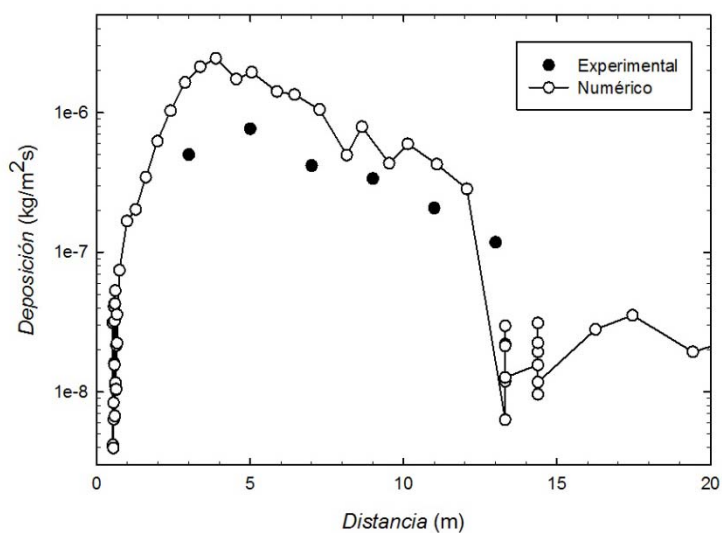


Gráfico 83. Línea de deposición c138 del caso 7 (26/02/13).

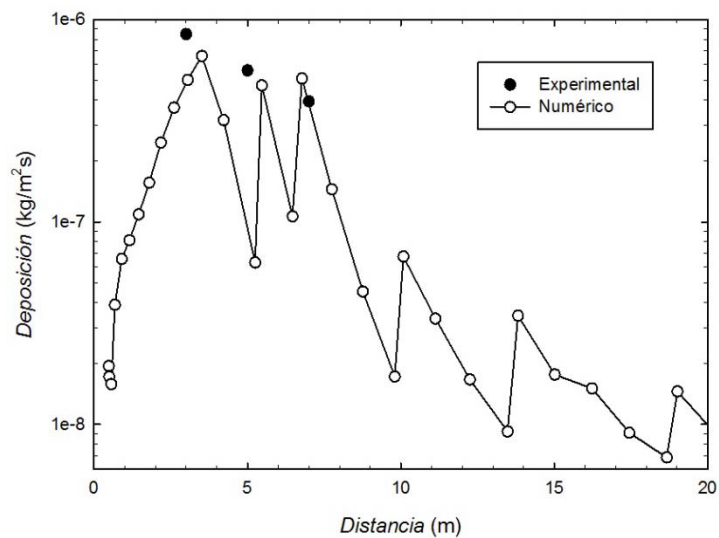


Gráfico 84. Línea de deposición c153 del caso 7 (26/02/13).

Tabla 12. Resumen VMD del caso 7 (26/02/13).

Papelillo	Medidas experimentales VMD (mm)	Modelo numérico VMD(mm)	Gotas
C108D3	0.3969	0.4525	51
C108D5	0.4174	0.3659	80
C108D7	0.2808	0.3129	25
C123D3	0.4730	0.4935	1519
C123D5	0.4012	0.4218	1404
C123D7	0.3356	0.3258	606
C123D9	0.2696	0.1960	1
C138D3	0.4257	0.5053	3900
C138D5	0.4541	0.4439	4663
C138D7	0.3407	0.3510	2023
C138D9	0.3511	0.2849	993
C138D11	0.3180	0.2526	560
C138D13	0.2531	0.0000	0
C153D3	0.4490	0.5068	276
C153D5	0.3895	0.4454	419
C153D7	0.3554	0.3654	168

En este caso ocurre algo diferente al resto, las líneas de deposición de los extremos forman un ángulo entre ellas no muy grande (de 45°), dejando además a la dirección principal (143.49°) lejos de ambos extremos. Esto provoca que los resultados de deposición y VMD del modelo numérico sean muy similares a los experimentales. Además se observa en la línea c138, que es la que tiene más papelillos, como la tendencia experimental y numérica, tanto en deposición como en VMD es idéntica.

•Caso 8: 22/03/2013

Por tener una temperatura de 18.81°C este caso es considerado primaveral, la velocidad del caso es de 2.04 m/s (considerado con velocidad baja). La dirección principal es 302.42° . A continuación se muestran la gráficas de deposición y VMD de dicho caso. Es importante destacar que este caso ha sido simulado con la malla D, que tiene elementos más pequeños en la zona donde se produce la deposición.

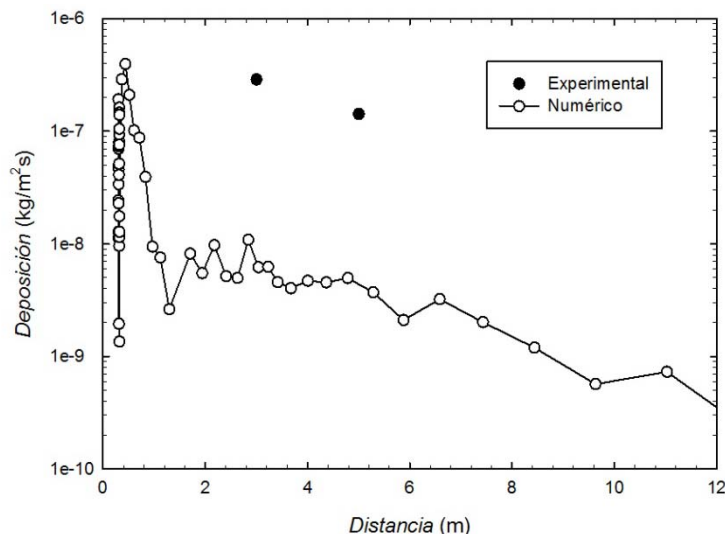


Gráfico 85. Línea de deposición c258 del caso 8 (22/03/13).

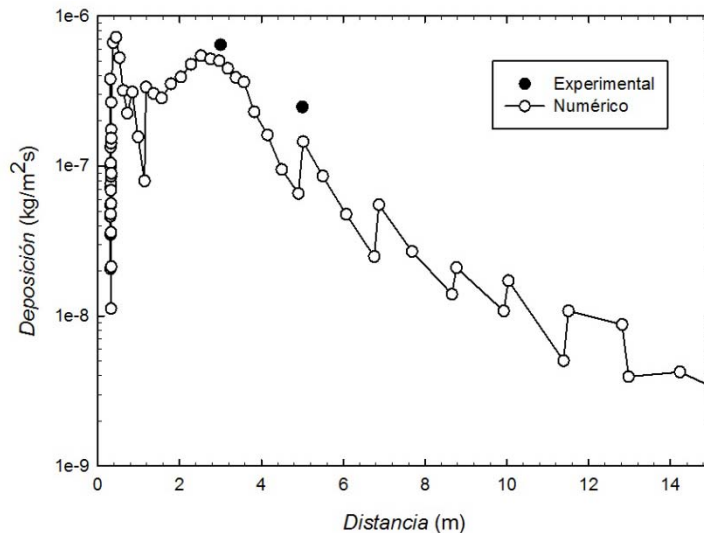


Gráfico 86. Línea de deposición c273 del caso 8 (22/03/13).

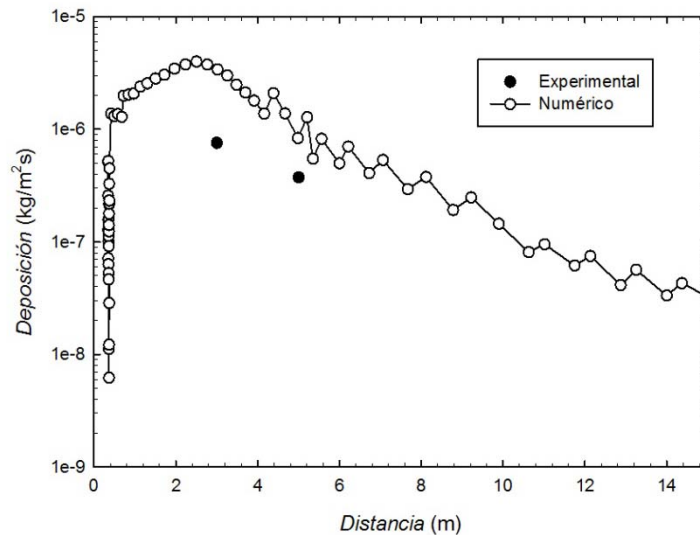


Gráfico 87. Línea de deposición c288 del caso 8 (22/03/13).

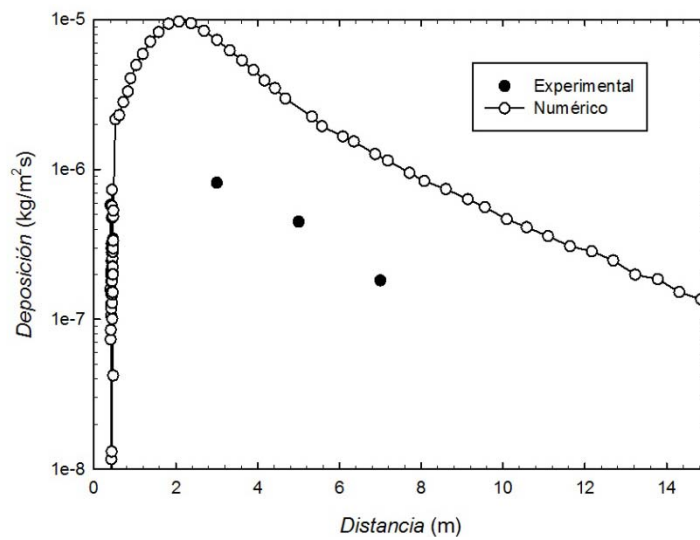


Gráfico 88. Línea de deposición c303 del caso 8 (22/03/13).

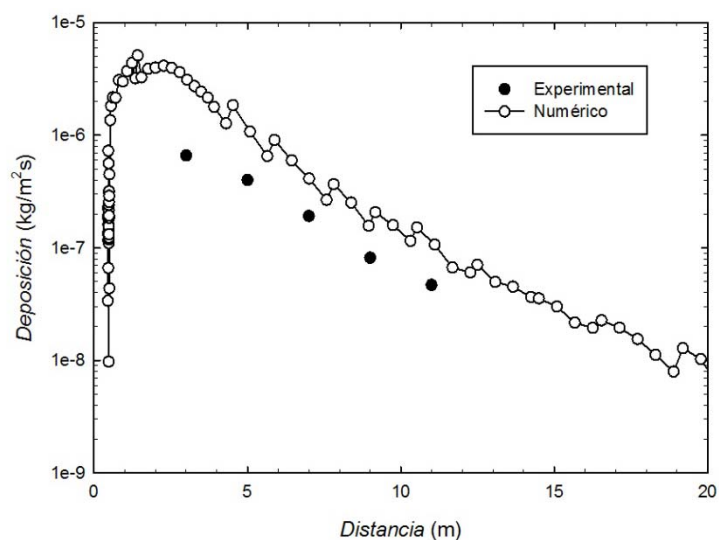


Gráfico 89. Línea de deposición c318 del caso 8 (22/03/13).

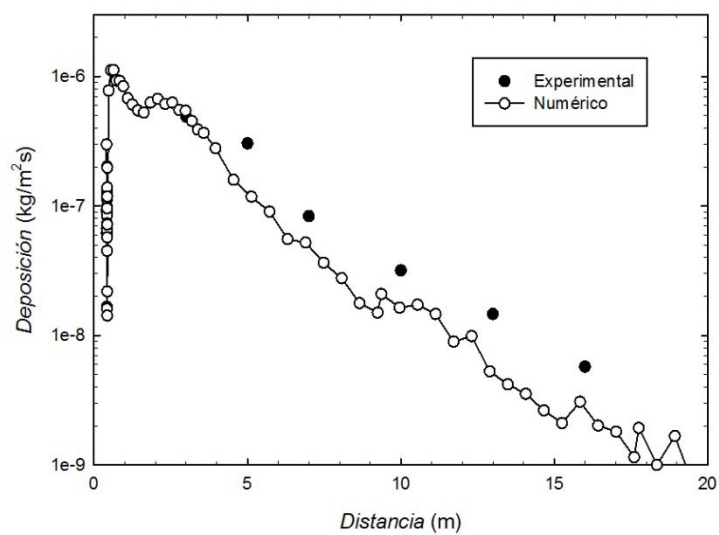


Gráfico 90. Línea de deposición c333 del caso 8 (22/03/13).

Tabla 13. Resumen VMD del caso 8 (22/03/13).

Papelillo	Medidas experimentales VMD (mm)	Modelo numérico VMD(mm)	Gotas
C258D3	0.3987	0.5998	22
C258D5	0.2786	0.2073	9
C273D3	0.4276	0.6325	550
C273D5	0.3091	0.3677	177
C288D3	0.4190	0.6033	6583
C288D5	0.3398	0.3757	1736
C303D3	0.4438	0.5052	13155
C303D5	0.3521	0.3391	4673
C303D7	0.2680	0.2564	2313
C318D3	0.4092	0.5139	6629
C318D5	0.3584	0.3265	1874
C318D7	0.2976	0.2407	849
C318D9	0.2297	0.2198	437
C318D11	0.2124	0.1769	240
C333D3	0.4304	0.4877	656
C333D5	0.3659	0.3182	235
C333D7	0.2755	0.2358	109
C333D10	0.2069	0.2133	36
C333D13	0.1728	0.1668	14
C333D16	0.1426	0.1708	5

Al interpretar los resultados, lo primero que llama la atención es que al usar la malla con el interior refinado, la forma de las gráficas es mucho más suave, efecto de tener más elementos, y por lo tanto más datos de deposición en el numérico, y más gotas para el VMD. Los resultados del numérico son bastantes similares a los experimentales, excepto en la línea c258, que está muy alejada de la dirección principal (302.42°). También se aprecia en este caso que la línea c303 tiene ligeramente más de deposición en el numérico que en el experimental. La validación experimental del VMD es bastante buena, encontrando como únicas objeciones que en las cercanías de la torre (3 m), las líneas c273 y c288 tienen un VMD más alto en el numérico que en el experimental. En las líneas con más papelillos (c318 y c333), se aprecia como la tendencia seguida por la deposición y el VMD del modelo numérico es prácticamente idéntica a la que siguen los datos experimentales, la deposición y el VMD decaen rápidamente con la distancia.

•Caso 9: 07/06/2013

El caso 9 también ha sido simulado por medio de la malla D, la dirección principal de este caso es 287.01°. El caso es considerado de verano por tener una temperatura de 22.16°C y con velocidad alta, ya que tiene una velocidad de 3.46 m/s. Para el ensayo de deposición se utilizaron 20 papeles hidrosensibles, repartidos en 6 líneas de deposición. Los resultados obtenidos del modelo numérico se muestran a continuación:

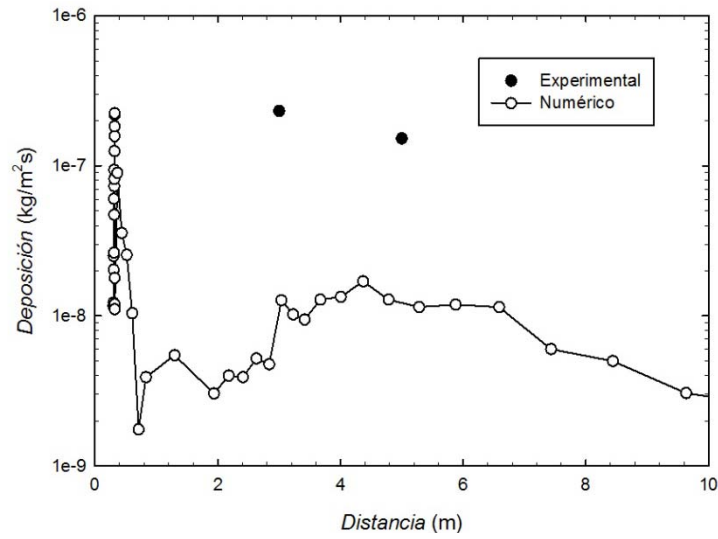


Gráfico 91. Línea de deposición c258 del caso 9 (07/06/13).

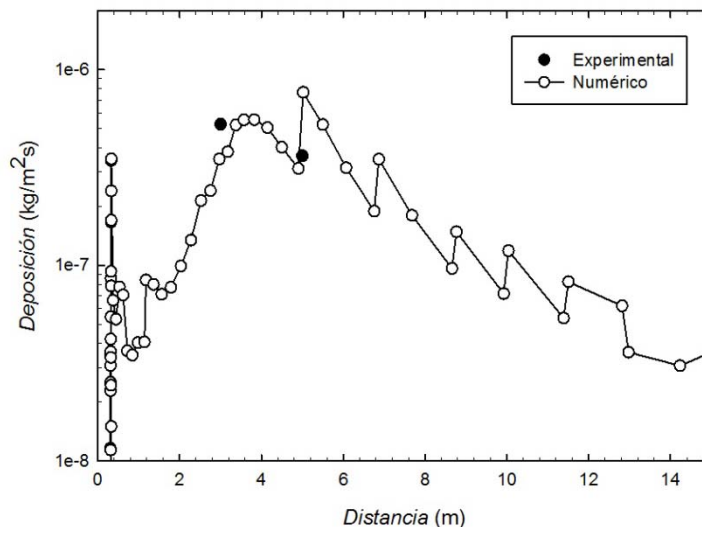


Gráfico 92. Línea de deposición c273 del caso 9 (07/06/13).

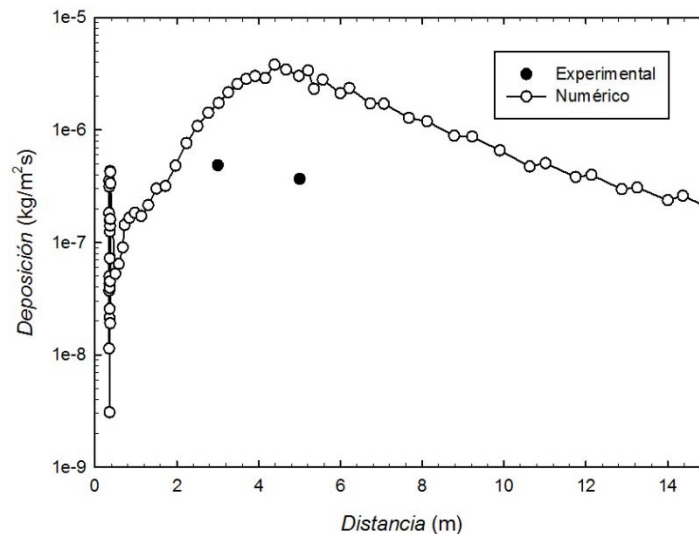


Gráfico 93. Línea de deposición c288 del caso 9 (07/06/13).

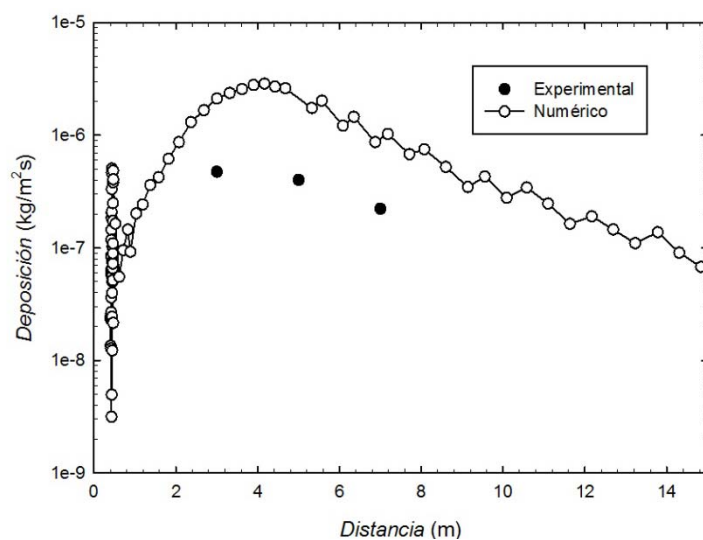


Gráfico 94. Línea de deposición c303 del caso 9 (07/06/13).

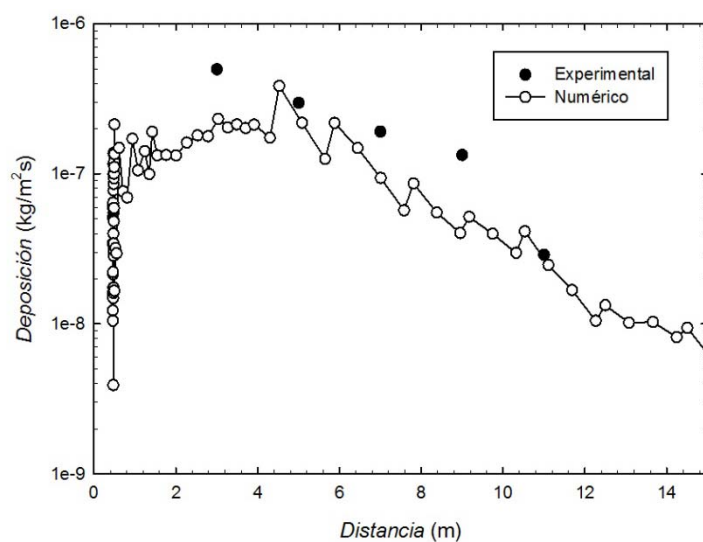


Gráfico 95. Línea de deposición c318 del caso 9 (07/06/13).

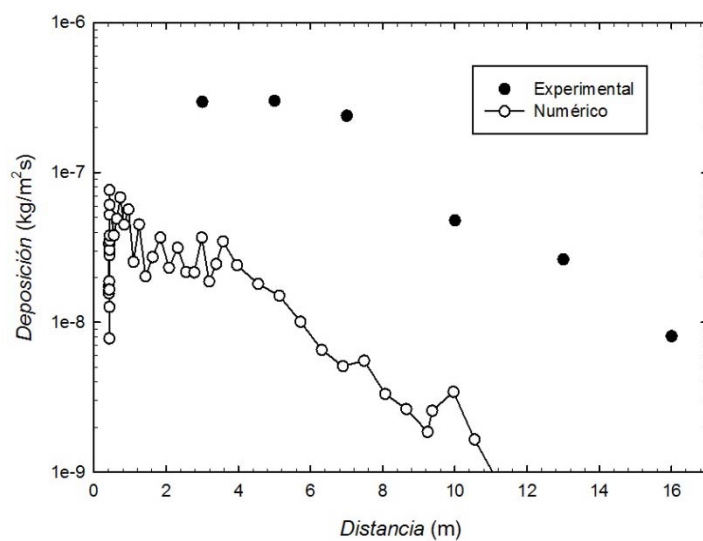


Gráfico 96. Línea de deposición c333 del caso 9 (07/06/13).

Tabla 14. Resumen VMD del caso 9 (07/06/13).

Papelillo	Medidas experimentales VMD (mm)	Modelo numérico VMD(mm)	Gotas
C258D3	0.3801	0.3170	26
C258D5	0.2787	0.3120	40
C273D3	0.4590	0.5598	451
C273D5	0.3904	0.5007	897
C288D3	0.4611	0.5814	3580
C288D5	0.3596	0.5029	5977
C303D3	0.4492	0.5324	3647
C303D5	0.3943	0.4358	3822
C303D7	0.3316	0.3271	1738
C318D3	0.4332	0.4127	506
C318D5	0.3672	0.3273	368
C318D7	0.2991	0.2986	187
C318D9	0.2685	0.2291	102
C318D11	0.2092	0.2278	48
C333D3	0.4190	0.2901	35
C333D5	0.3691	0.2188	36
C333D7	0.3553	0.2680	11
C333D10	0.2300	0.1106	2
C333D13	0.2052	0.0598	1
C333D16	0.1219	0.0000	0

Al igual que en el caso anterior, en este caso se aprecia la suavidad de las gráficas de deposición, causa de haber utilizado la malla D para la simulación. La validación experimental de la deposición y el VMD es positiva en las líneas más cercanas a la dirección principal, pero en las líneas c258, c273 y c333 la deposición y el VMD experimental son superiores al numérico, debido a las antes mencionadas posibles fluctuaciones de la dirección del viento durante el ensayo de deposición. Nuevamente se aprecia que la tendencia que siguen los resultados del numérico siguen la misma tendencia que los datos experimentales: una fuerte atenuación con la distancia.

•Caso 10: 13/06/2013

Este último caso ha sido simulado usando nuevamente la malla D (refinada), el caso es de verano por tener una temperatura de 29.15°C, y con velocidad baja (2.39 m/s). La dirección principal es 332.43°. Nuevamente se tomaron medidas en 20 papeles hidrosensibles repartidos en 6 líneas de deposición. Las gráficas de deposición y VMD se muestran a continuación.

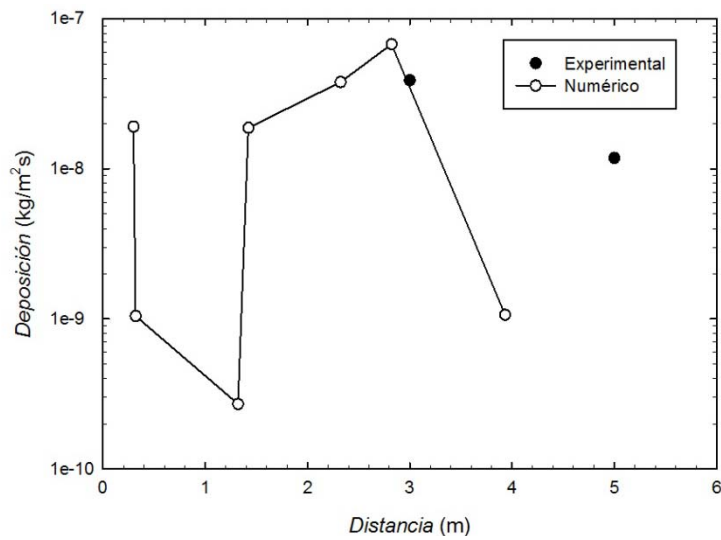


Gráfico 97. Línea de deposición c258 del caso 10 (13/06/13).

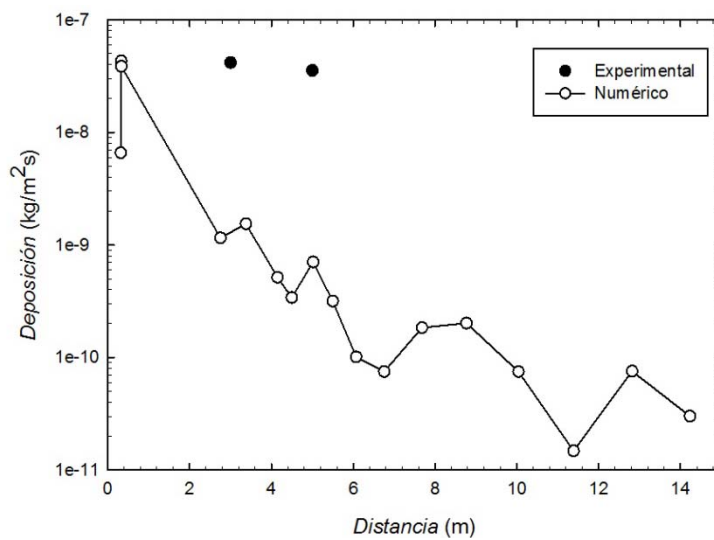


Gráfico 98. Línea de deposición c273 del caso 10 (13/06/13).

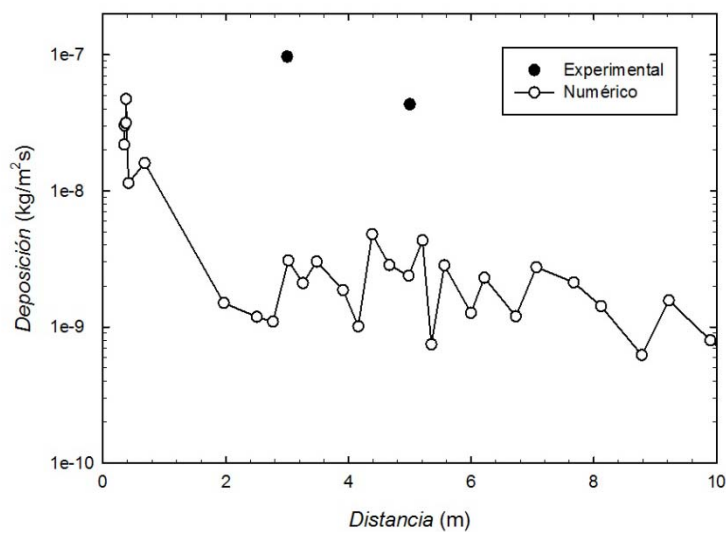


Gráfico 99. Línea de deposición c288 del caso 10 (13/06/13).

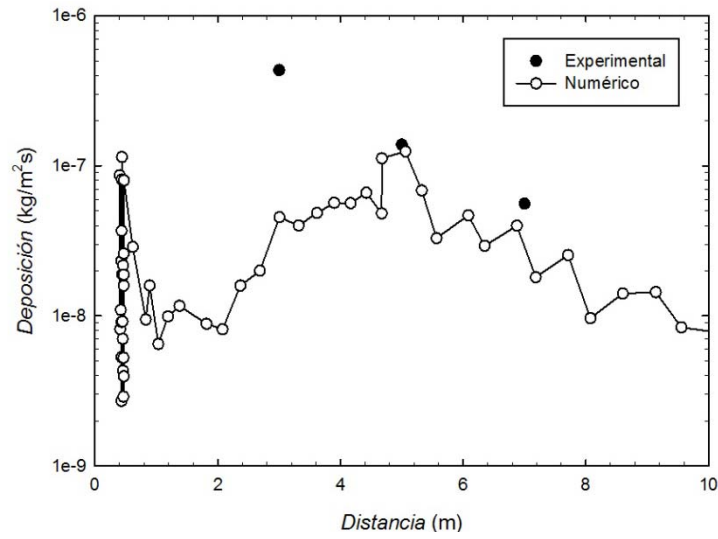


Gráfico 100. Línea de deposición c303 del caso 10 (13/06/13).

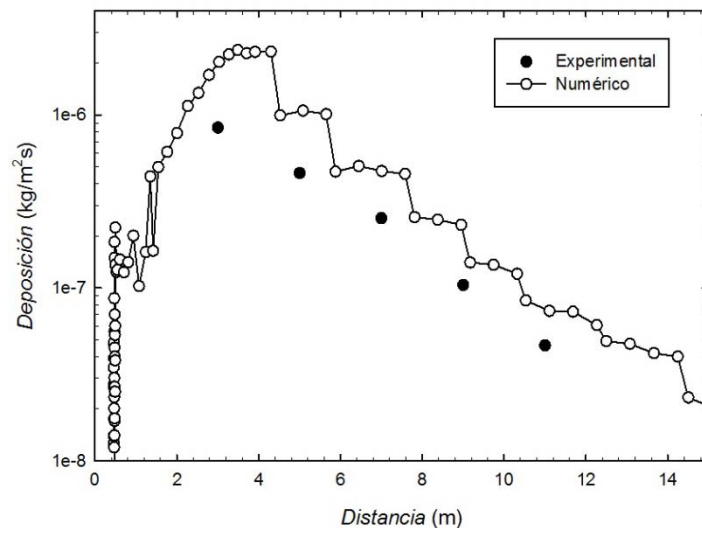


Gráfico 101. Línea de deposición c318 del caso 10 (13/06/13).

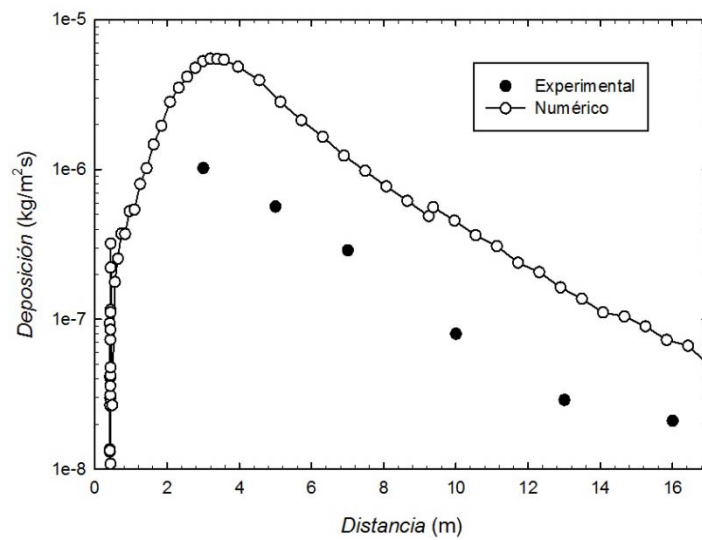


Gráfico 102. Línea de deposición c333 del caso 10 (13/06/13).

Tabla 15. Resumen VMD del caso 10 (13/06/13).

Papelillo	Medidas experimentales VMD (mm)	Modelo numérico VMD(mm)	Gotas
C258D3	0.3648	0.0000	0
C258D5	0.2015	0.0000	0
C273D3	0.2977	0.2299	1
C273D5	0.3629	0.0000	0
C288D3	0.3516	0.4213	4
C288D5	0.3261	0.2432	8
C303D3	0.4274	0.5673	129
C303D5	0.3011	0.3936	130
C303D7	0.2538	0.2846	72
C318D3	0.3999	0.5504	3705
C318D5	0.3263	0.4231	2736
C318D7	0.2864	0.3083	1077
C318D9	0.2416	0.2537	576
C318D11	0.1900	0.2134	260
C333D3	0.4210	0.5359	10360
C333D5	0.3279	0.3948	6569
C333D7	0.2529	0.2985	3095
C333D10	0.2171	0.2282	1295
C333D13	0.1823	0.1901	662
C333D16	0.1454	0.1709	383

La interpretación para la validación de este último caso es la siguiente: las líneas c258, c273 y c288 dan resultados no válidos, por estar muy lejos de la dirección principal (332.43°). En las otras tres líneas los resultados de deposición del numérico son similares a los experimentales, pero en el VMD, nuevamente, en las cercanías de la torre (a 3 metros) las gotas del numérico tienen mayor diámetro que las medidas experimentalmente. Nuevamente se aprecia en las líneas con más medidas experimentales (c318 y c333) que la tendencia de los resultados de deposición y VMD del modelo numérico se corresponde con la tendencia que siguen los datos tomados experimentalmente.

4.5. Conclusiones de la validación experimental

En base a todo lo anterior se pueden extraer las siguientes conclusiones sobre la validación del modelo numérico:

La capa límite viscosa y la capa límite térmica del modelo numérico presenta homogeneidad horizontal, es decir, todos los puntos del dominio que están a la misma altura tienen aproximadamente la misma velocidad y la misma temperatura, tal y como ocurre en la realidad. Ambas capas también son capaces de mantener los perfiles de velocidad y temperatura a lo largo del dominio, sin deformaciones anómalas, tal y como ocurre en la realidad. En dos casos ha habido diferencias entre los resultados de temperatura y velocidad del modelo numérico y los datos experimentales tomados mediante la torre de medición meteorológica, pero esas diferencias no son significativas, y tienen su solución mediante el empleo de los perfiles de velocidad y temperatura obtenidos por medio de los datos tomados en la

torre de medición meteorológica como condición de contorno, en lugar de los perfiles obtenidos mediante la estación meteorológica.

En cuanto a la deposición y el VMD, los resultados obtenidos del modelo numérico tienen un grado de coincidencia con los experimentales bastante alto. Es importante destacar que en los casos en los que se tienen líneas de deposición con varios papelillos, la tendencia tanto en deposición como en VMD del modelo numérico es idéntica a la que siguen las medidas experimentales, señal inequívoca de la validez del modelo numérico si se le define correctamente la distribución de diámetros de la fase discreta.

Tan sólo se han encontrado dos pequeños desajustes entre los resultados numéricos y experimentales de la fase discreta:

- En las direcciones muy alejadas de la dirección principal, los resultados de deposición y VMD del modelo numérico son menores que los experimentales, llegando en algunos casos tener deposición nula. Como ya se ha comentado, este problema es debido a que el modelo numérico es estacionario, por lo que no puede simular las fluctuaciones en la dirección del viento que ocurren en la realidad y provocan una ligera deposición en las líneas más alejadas de la dirección principal.
- Otro pequeño desajuste existente entre los resultados del modelo numérico y los experimentales es el siguiente: en algunos casos donde hay una línea de deposición prácticamente coincidente con la dirección principal del caso, los resultados de VMD y deposición en esa línea son ligeramente superiores en el modelo numérico. La explicación a este ligero desajuste, al igual que anteriormente, tiene su origen en que el modelo numérico es estacionario, por lo que todas las gotas de agua son arrastradas por el viento que fluye siguiendo la dirección principal, mientras que en la realidad, algunas gotas son desviadas de la dirección principal por las fluctuaciones en la dirección del viento, provocando una menor deposición y un menor VMD en la dirección principal del que habría si el viento soplará continuamente en la misma dirección.

Estos dos ligeros desajustes en la validación podrían solucionarse mediante una simulación segmentada, es decir, realizar tres simulaciones para cada caso, cada simulación abarcaría un rango de direcciones del viento. El resultado final de deposición y VMD sería la media ponderada de los resultados obtenidos en las tres simulaciones, la importancia (peso) de los resultados de cada caso dependería de la fracción de tiempo sobre el tiempo total de ensayo que el viento hubiera soplado en ese rango de direcciones.

A modo de ejemplo, se explicará cómo se haría la simulación segmentada para el caso 8 (22/03/2012): se parte de las medidas experimentales de velocidad y dirección del viento tomadas por el grupo de investigación de la UMH de Elche. Se dividen las medidas tomadas en tres conjuntos de datos, según la frecuencia relativa de la dirección del viento: un primer conjunto principal que contenga el rango de ángulos que suponga el 80% de las medidas tomadas, y dos conjuntos que contengan cada uno

el 10% de las medidas tomadas, uno con direcciones mayores que el conjunto principal y otro con direcciones menores que el ángulo principal. A continuación se sacan la velocidad y dirección promedio de cada uno de los tres rangos de datos, mediante un método de filtrado, tal y como se explicó en la sección 3.4.

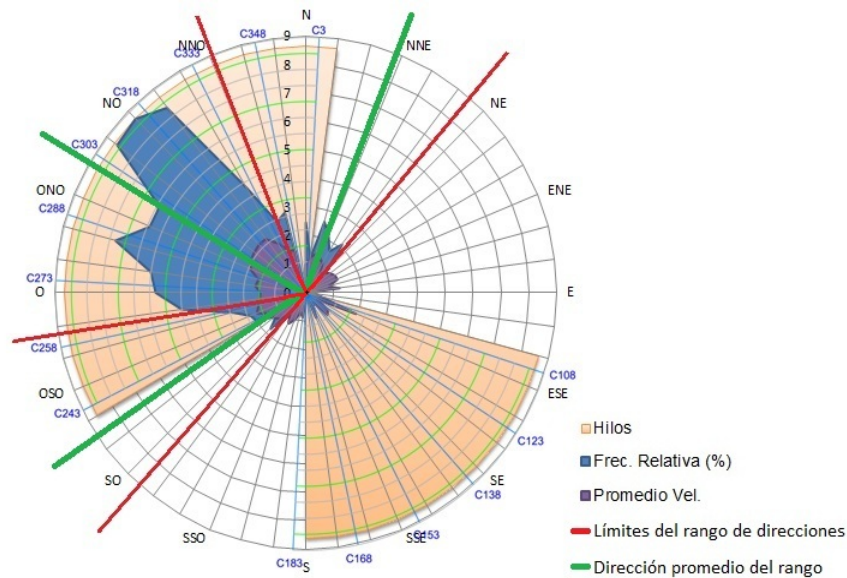


Fig. 28. Mapa de frecuencia relativa de la dirección del viento dividido en rangos para la simulación segmentada.

En la figura 28 se observa claramente lo explicado anteriormente: en el ensayo del día 22/03/2013, el viento sopló el 80% del tiempo de ensayo con direcciones comprendidas entre 262° y 338° (rango principal), mientras que los otros dos rangos de direcciones servirán para simular las fluctuaciones de dirección que tuvo el viento durante el ensayo.

Para la simulación con el modelo numérico se lanzarían tres casos, cada uno de ellos con un giro de malla diferente, el primero tendría una dirección del viento de 302°, el segundo de 20°, y el tercero de 236°. A la hora de procesar los resultados, la deposición en cada punto del dominio sería 0.8 por la deposición del primer caso, más 0.1 por la deposición del segundo caso, más 0.1 por la deposición del tercer caso. Para obtener el VMD de cada papel hidrosensible se procedería igual que con la deposición.

Con este método de segmentación se conseguiría que el modelo numérico tuviese en cuenta las fluctuaciones en la dirección del viento, pero con la desventaja de tener que realizar tres simulaciones para cada caso.

Capítulo 5

Resultados

5.1. Introducción

En este último capítulo se presentarán algunas de las conclusiones que se pueden obtener a partir de los resultados obtenidos a través de las simulaciones realizadas.

En primer lugar se hará un resumen donde se mostrarán los principales parámetros y resultados de cada simulación, buscando relaciones entre ellos. También se introducirá el concepto de inestabilidad atmosférica, la cual se analizará mediante imágenes de las trayectorias de las partículas en distintos casos.

En la sección Futuras líneas de trabajo se presentarán los siguientes objetivos del proyecto general en el cual se integra este Proyecto Fin de Carrera, explicando algunas de las posibles aplicaciones del modelo numérico.

5.2. Resultados

Este análisis de resultados se hará en base a los 10 casos simulados, cada uno de ellos con distintas condiciones atmosféricas. A continuación, con la finalidad de recordar los casos simulados y sus características, se muestra la tabla resumen de las condiciones de cada caso.

Tabla 16. Características principales de cada caso.

nº Caso	Fecha	Estación	Velocidad viento	Dirección viento
1	18/06/2012	Verano	Alta	NO
2	31/07/2012	Verano	Baja	NO
3	02/10/2012	Verano	Baja	NO
4	22/10/2012	Primavera	Baja	SE
5	11/01/2013	Invierno	Alta	SE
6	14/02/2013	Primavera	Baja	SE
7	26/02/2013	Invierno	Alta	SE
8	22/03/2013	Primavera	Baja	NO
9	07/06/2013	Verano	Alta	NO
10	13/06/2013	Verano	Baja	NO

Se realizarán dos estudios principales: en primer lugar se hará un estudio de la relación entre la deposición y la velocidad del viento; en segundo lugar se hará un estudio sobre el destino de las gotas en cada caso, relacionando los siguientes parámetros de cada caso: temperatura, humedad, tamaño de las gotas y evaporación.

5.2.1. Influencia de la velocidad del viento en la deposición

Para este análisis se compararán dos parámetros del modelo numérico: la distancia a la que se produce máxima deposición y la velocidad del viento. A continuación se muestra una tabla con los resultados obtenidos para cada caso.

Tabla 17. Velocidad y distancia de máxima deposición en cada uno de los casos.

nº Caso	Fecha	velocidad (m/s)	distancia máx. deposición (m)
1	18/06/2012	3.09	3.50
2	31/07/2012	2.15	2.52
3	02/10/2012	2.05	2.72
4	22/10/2012	1.01	4.37
5	11/01/2013	5.89	7.78
6	14/02/2013	2.64	6.36
7	26/02/2013	3.26	3.82
8	22/03/2013	2.04	2.00
9	07/06/2013	3.46	4.90
10	13/06/2013	2.39	3.35

El interés de este análisis es poder, a partir de la velocidad del viento, delimitar las áreas de máxima concentración de *Legionella* en el hipotético caso de que se produjera un brote.

La gráfica obtenida es la siguiente:

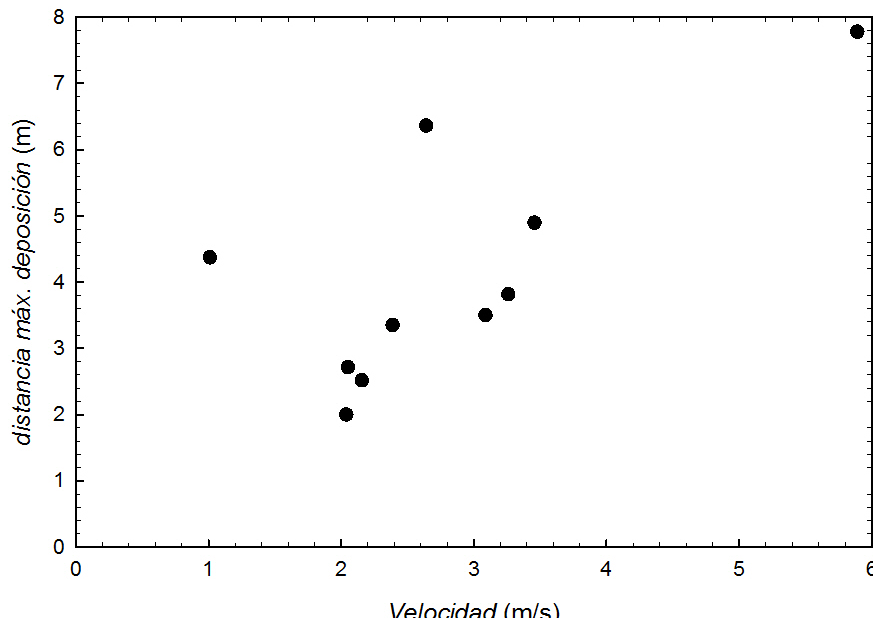


Gráfico 103. Gráfico general de distancia de máxima deposición en función de la velocidad.

Se aprecia una proporcionalidad clara entre ambas magnitudes, obteniendo tan sólo dos puntos atípicos (casos 4 y 6) donde la máxima deposición se produce aproximadamente dos metros por encima del valor que tendría si siguiera la tendencia del resto de puntos. Las ecuaciones que se obtienen al hacer una regresión lineal son:

$$d_{max} = 0.966 \cdot v + 1.430 \quad \text{con } R^2 = 0.487 \quad (5.1)$$

$$d_{max} = 1.395 \cdot v - 0.419 \quad \text{con } R^2 = 0.960 \quad (5.2)$$

donde d_{max} es la distancia al foco emisor donde se produce la máxima deposición, v es la velocidad del viento a una altura de 10.56 m. La recta (5.1) contempla los 10 puntos, la (5.2) se ha realizado excluyendo los dos puntos atípicos, de ahí que tenga un R^2 muy cercano a la unidad.

En base al estudio anterior, se concluye que la distancia en la que ocurre la máxima está relacionada con la velocidad del viento, llegando las gotas más lejos cuanto más fuerte es el viento, tal y como cabría esperar.

5.2.2. Influencia de las condiciones de temperatura, humedad y tamaño de las gotas en la deposición

En esta sección se analizarán distintos parámetros de cada simulación: la máxima deposición, el tamaño de las gotas, la temperatura y humedad relativa ambiental a 10.56 m y la temperatura de las gotas. También se mostrará el destino de las gotas en cada caso, es decir: el porcentaje de masa de agua que se evapora, el que se deposita en la torre del edificio, el que se deposita fuera de la torre del edificio, y el que escapa del dominio. El objetivo es poder obtener conclusiones sobre los fenómenos de evaporación.

Antes de comenzar el análisis de los resultados es importante comentar que la máxima deposición no se tratará como tal en esta sección, sino que se dividirá entre el gasto másico de la simulación, con el fin de poder comparar directamente dicha relación en cada uno de los casos sin que dependa del gasto másico del caso. Así, la máxima deposición pasar a tener unidades de $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ a unidades de m^{-2} , y cuantifica que fracción del gasto másico se deposita en el metro cuadrado del dominio con más deposición.

Los resultados obtenidos se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 18. Resultados de temperatura, humedad y evaporación en los distintos casos.

Caso	Fecha	Máx. dep. (m^{-2})	HR (%)	Temp. atmosf. ($^{\circ}C$)	Temp. gotas ($^{\circ}C$)	\bar{d} $10^{-3} mm$	Destino gotas			
							Destino	Suelo	Evap.	Escapa
1	18/06/2012	7.76E-03	65.96	24.58	22.56	0.072	24.3%	2.9%	72.8%	0.0%
2	31/07/2012	4.82E-02	43.82	31.07	24.14	0.735	49.3%	0.2%	50.6%	0.0%
3	02/10/2012	7.39E-02	32.40	23.35	20.21	0.350	75.0%	1.2%	23.9%	0.0%
4	22/10/2012	2.94E-02	60.14	18.39	14.14	0.363	24.0%	25.8%	50.0%	0.0%
5	11/01/2013	1.58E-02	66.65	11.18	8.74	0.332	15.5%	66.6%	1.8%	15.5%
6	14/02/2013	1.68E-03	41.89	16.42	10.68	0.033	3.9%	3.5%	92.6%	0.0%
7	26/02/2013	2.56E-02	34.09	9.81	4.31	0.332	36.5%	46.2%	0.0%	17.2%
8	22/03/2013	7.39E-02	58.49	18.81	15.33	0.331	58.8%	0.7%	40.5%	0.0%
9	07/06/2013	2.78E-02	59.09	22.16	19.04	0.281	50.2%	3.1%	46.8%	0.0%
10	13/06/2013	4.11E-02	24.20	29.15	19.11	0.327	46.7%	0.1%	53.2%	0.0%

El parámetro \bar{d} es el diámetro tal que las gotas de menor diámetro suponen el 63.2 % de la masa total de agua que sale de la torre de refrigeración (ver distribución Rosin-Rammler en sección 3.4.2). Por lo que \bar{d} sirve para caracterizar el tamaño de las gotas expulsadas de la torre de refrigeración en el ensayo de arrastre.

Observando la tabla anterior se pueden obtener algunas conclusiones a simple vista:

- En los casos 1 y 6 hay una evaporación muy superior al resto de casos, se observa que ambos casos tienen \bar{d} del orden de cinco y diez veces menor (respectivamente) que el resto de casos. Además el caso 1 tiene $\bar{d} = 0.072 \cdot 10^{-3} mm$ y se evapora el 72.8% de la masa de agua que sale de la torre, mientras que el caso 6 tiene $\bar{d} = 0.033 \cdot 10^{-3} mm$ y presenta una evaporación del 92.6% de la masa de agua que sale de la torre. Por lo que se llega a la conclusión de que el tamaño de las gotas es el factor más influyente en la cantidad de agua evaporada, provocando mayor evaporación cuanto menor sea el tamaño de las gotas que salen de la torre de refrigeración, debido a que muchas gotas pequeñas presentan más superficie que pocas gotas grandes, facilitando la transmisión de calor por convección. La razón por la cual los casos 1 y 6 tienen \bar{d} tan pequeño es debido a que en el ensayo de arrastre se utilizó el sistema de distribución por presión (pulverizado), mientras que en el resto de casos se utilizó el sistema de distribución por gravedad, ambos sistemas de distribución están explicados en la sección 3.4.2. A raíz de la alta evaporación, ambos casos tienen una máxima deposición menor a la del resto de casos.

- No se observa ninguna relación clara entre la fracción másica de agua evaporada y la humedad relativa atmosférica.
- Para analizar la relación de la temperatura con la evaporación, es importante recordar que para que una gota de agua empiece a experimentar fenómenos de evaporación, ésta debe de alcanzar la temperatura T_{vap} , tal y como se expuso en la sección 2.4.3. Para el modelo numérico $T_{vap} = 284 \text{ K}$ (11°C). Como consecuencia, en el caso 7 no hay evaporación, ya que las gotas de agua se encuentran a 4.31°C , y el aire atmosférico a 9.81°C , ambos por debajo de T_{vap} . En el caso 5 ocurre algo similar, las gotas salen de la torre a 8.74°C , y el aire está a 11.18°C , para que haya evaporación el aire debe calentar las gotas por convección hasta T_{vap} , pero la temperatura del aire atmosférico está sólo 0.18°C por encima de T_{vap} , por lo que las gotas para comenzar a experimentar evaporación deberán de enfriarse desde 8.74°C hasta 11°C , con la limitación de que al aire que les transfiere calor está a 11.18°C , por esta razón el caso 5 sólo tiene 1.8% de masa evaporada.

A continuación se analizará de forma más profunda la relación entre la evaporación (m_{evap}) y las temperaturas atmosférica (T_a) y de las gotas (T_g). La evaporación está directamente relacionada con la temperatura de cada gota de agua T_g . Además, la mayor parte de la transferencia de calor que supone el aumento de temperatura de las gotas se debe a la convección producida en la interfase aire-gota, que es proporcional a la diferencia de temperatura entre el aire y la gota (ecuación (2.61)). Por lo que en teoría, la evaporación debería de ser proporcional a la temperatura de las gotas, y a la diferencia de temperatura entre el aire y la gota. La ecuación que se propone es la siguiente:

$$m_{evap} = k_1 \cdot T_g + k_2 \cdot (T_a - T_g) \quad (5.3)$$

Donde k_1 y k_2 son las constantes que se hallarán mediante regresión lineal múltiple, excluyendo los casos 1 y 6 por tener \bar{d} mucho menor que el resto de casos. Con el fin de conseguir una correlación más sencilla, se pondrá (5.3) como:

$$m_{evap} = (k_1 - k_2) \cdot T_g + k_2 \cdot T_a = k_3 \cdot T_g + k_2 \cdot T_a \quad (5.4)$$

Se realiza la regresión lineal múltiple y se obtiene:

$$m_{evap} = 1.892 \cdot T_g + 0.563 \cdot T_a - 14.223 \quad \text{con } R^2 = 0.661 \quad (5.5)$$

$$m_{evap} = 2.157 \cdot T_g + 0.394 \cdot T_a - 20.129 \quad \text{con } R^2 = 0.799 \quad (5.6)$$

La fórmula (5.5) tiene en cuenta las temperaturas y la evaporación de los 8 casos simulados, mientras que (5.6) excluye el caso 4, ya que proporciona resultados que no siguen la tendencia de los resultados del resto de casos.

Mediante las ecuaciones anteriores será posible estimar la masa que se evaporará en cada caso, tan sólo a partir de las temperaturas atmosféricas y de las gotas de agua.

Siguiendo con la influencia de la temperatura en la cantidad de masa que se evapora, se introducirá el concepto de atmósfera estable y atmósfera inestable, concepto muy relacionado con la capa límite térmica:

- La capa límite térmica es estable cuando el gradiente de temperatura entre las diferentes alturas de la atmósfera no es suficientemente grande como para producir la mezcla de los estratos de aire que se encuentran a diferentes alturas.
- La capa límite térmica es inestable cuando el gradiente térmico entre las diferentes alturas de la atmósfera es suficientemente grande como para provocar el mezclado de los diferentes estratos de la atmósfera, debido a que el aire caliente es menos denso y asciende sobre el aire que tiene encima que al ser más frío tiene más densidad.

El límite para que la capa límite térmica se considere estable o inestable es -0.0098 K/m , es decir si al ascender verticalmente 100 m la temperatura baja más de 0.98 K se considerara la atmósfera como inestable, mientras que si la temperatura baja menos de 0.98 K respecto al punto donde se empezó a ascender se tratará de atmósfera estable.

La influencia de la estabilidad o inestabilidad de la capa límite térmica sobre el destino de las gotas de agua que salen de la torre de refrigeración es importante, ya que bajo condiciones de inestabilidad, el ascenso del aire caliente supondrá una fuerza ascendente para las gotas, a causa de la se mantendrán más tiempo flotando en el aire y tendrán más tiempo para evaporarse.

La forma de identificar la capa límite térmica del modelo numérico como estable o inestable es mediante el análisis del perfil vertical de temperatura que se pondrá como condición de contorno a la entrada; si el coeficiente por el que se multiplica la altura z es mayor (en valor absoluto) de 0.0098 se tratará de atmósfera inestable, como es el caso de los perfiles hallados mediante la estación meteorológica (ecuación (3.46)) en donde el coeficiente vale 0.022 . Llegados a este punto surge otra vez la necesidad de simular los casos con las temperaturas obtenidas de la torre de medición meteorológica, ya que el perfil térmico obtenido mediante la única medida de temperatura a una altura tomada en la estación meteorológica no es capaz de simular las condiciones de atmósfera inestable, mientras que el perfil obtenido mediante la torre si podrá simular las condiciones de atmósfera estable o inestable mediante la pendiente b de la ecuación (3.47).

A continuación se muestra una imagen con la superposición de las trayectorias del caso 5 (11/01/13) simuladas con atmósfera estable (a partir de las temperaturas tomadas en la torre de medición meteorológica) y con atmósfera inestable (a partir de la temperatura tomada en la estación meteorológica). Se han representado 100 trayectorias aleatorias de cada una de las dos inyecciones. Los parámetros de la inyección son idénticos en ambos casos.

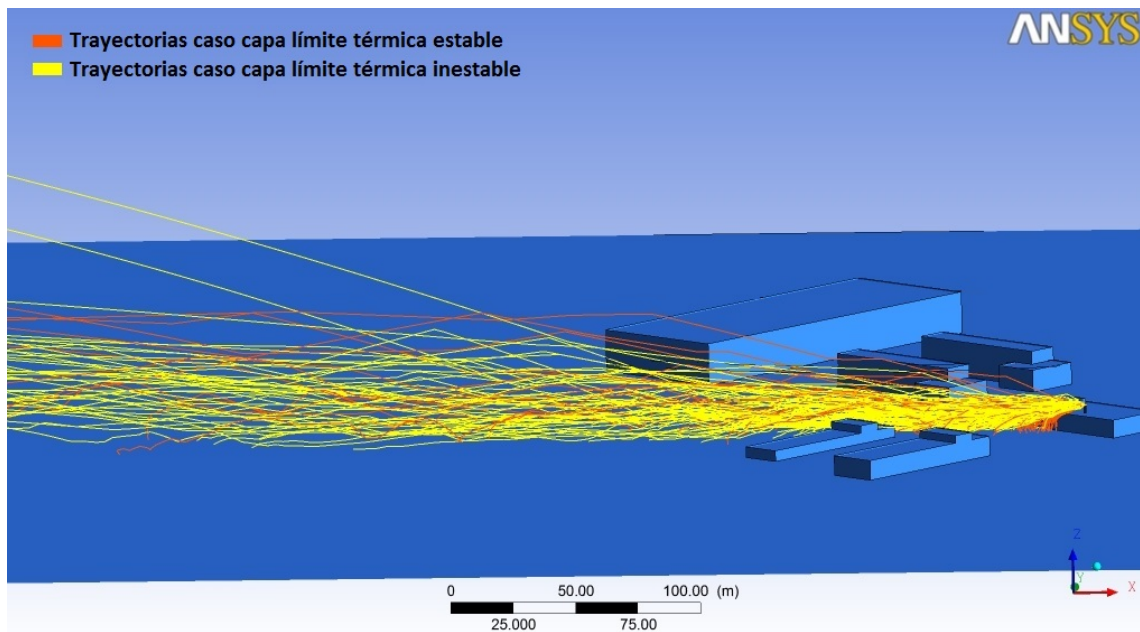


Figura 29. Comparación de las trayectorias en caso de capa límite térmica estable e inestable.

En la figura 29 se observa de manera muy clara la influencia de la capa límite térmica en la deposición. A pesar de ser tan solo 100 trayectorias de cada caso, se observa que en el caso de atmósfera estable la mayor parte de las gotas se depositan en el suelo, muy cerca de la torre de refrigeración; en el caso de atmósfera inestable, se observa como gran parte de las gotas no se depositan en el suelo, ya que el ascenso del aire supone una fuerza vertical ascendente en las gotas, prueba de ello es que algunas gotas sufren un brusco ascenso antes de escapar del dominio.

En base a lo comentado en esta sección, las conclusiones más importantes que se extraen del modelo numérico son las siguientes:

- La variable principal a la hora de predecir la cantidad de masa de agua evaporada es el tamaño de las gotas expulsada de la torre de refrigeración, existiendo más evaporación cuando más pequeñas sean las gotas.
- La cantidad de agua evaporada es proporcional tanto a la temperatura de las gotas, como a la temperatura del aire en contacto con las gotas, siendo más influyente sobre la evaporación la temperatura de las gotas que la del aire.
- Bajo condiciones de capa límite térmica inestable, las gotas encuentran más dificultades para depositarse en el suelo, debido a la flotación producida por el aire ascendente, por lo que están más tiempo en la atmósfera y tienen más posibilidades de sufrir fenómenos de evaporación.
- La distancia a la que se produce la máxima deposición es proporcional a la velocidad del viento.

Por lo que en un hipotético caso de *Legionellosis*, las condiciones más favorables para minimizar el riesgo de contagio serían: velocidad del viento baja, temperatura ambiente alta, atmósfera inestable, y que las gotas salieran de la torre con un diámetro muy pequeño y con una temperatura alta.

5.3. Futuras líneas de trabajo

Una vez validado el modelo numérico, se abre un abanico de posibilidades para esta línea de investigación dentro del proyecto principal “Análisis energético de instalaciones de climatización asociado a la variación del diseño de torres de refrigeración. Control de emisiones y su impacto en áreas urbanas” ENE2010-21679-C02-01.

La siguiente meta del proyecto es la simulación de la dispersión en nuevos entornos urbanos, como por ejemplo el entorno del hospital *Morales Meseguer* (Murcia), donde en julio de 2001 se produjo el brote de *Legionelosis* más grave documentado, siendo una torre de refrigeración del hospital la fuente de dispersión de la bacteria. La simulación se hará a partir de los datos ambientales de julio de 2001, consiguiendo delimitar el área a donde llegó la bacteria procedente de la torre de refrigeración, y por lo tanto las zonas donde la población pudo entrar en contacto con la bacteria.

La aplicación final del modelo numérico es la simulación de la dispersión producida en una torre de refrigeración, en distintos entornos urbanos donde pueda haber riesgo de aparición de brotes de *Legionelosis*. Más concretamente, se trataría de determinar el área de influencia de la torre de refrigeración, se realizarían 12 simulaciones, cada una de ellas con una diferente dirección del viento. De esta manera se podrían delimitar las zonas donde pudiera tener influencia la bacteria, disminuyendo las probabilidades de contagio de la población.

Anexo I.

Código *Matlab* empleado para calcular VMD

```
%Código para hallar VMD del caso 130613
format long
%necesitamos la matriz puntos (posiciones de los papelillos)
%necesitamos salida con tres columnas en este orden:
%1:time 2:ID 3:diam
%llegada con:
%1:time 2:ID 3:diam 4:posX 5:posY 6:posZ
%parametros de la rosim
gastoinyeccion=0.00011194;
dmean=0.0003267;
n=0.7;
ndiam=750;
ncells=256;
ntries=10;
%margenes de los papeles filtro
mx=0.2;
my=0.2;
%vectores que usaremos para hallar los pesos másicos por trayectoria
vm=zeros(ndiam,1);%diametros
vr=zeros(ndiam,1);%rossimramler del diametro
vp=zeros(ndiam,1);%peso másico del diámetro sobre el total
%pesotray=zeros(size(salida,1),1);%peso de cada trayectoria
%eliminar la columna de tiempos
salida=salida(:,[2 3]);
%sacar pesos másicos de los diámetros
for i=1:ndiam
    vm(i)=salida(1+ntries*(i-1),2);
    vr(i)=exp(-((vm(i)/dmean)^n));
    if i==1
        vp(i)=(1-vr(i))/(ntries*ncells);
        continue
    end
    vp(i)=(vr(i-1)-vr(i))/(ntries*ncells);
end
%emsamblar
%primero emsamblamos solo para una celda
vk=[];
for i=1:ndiam
    vt=[];
    for j=1:ntries
        vt=[vt;vp(i)];
    end
    vk=[vk;vt];
end
%segundo emsamblaje, extender el vector de peso a cada uno de las trayectorias
```

```

pesotray=[];
for i=1:ncells
    pesotray=[pesotray;vk];
end
%quitar la columna de tiempos de la llegada
llegada=llegada(:,[2 3 4 5 6]);
%eliminar filas que no caen al suelo
llegada=llegada(find(llegada(:,5)==7.27),:);
%contar gotas al suelo
gotasalsuelo=size(llegada,1)
%eliminar columna alturas
llegada=llegada(:,[1 2 3 4]);
%identificar las trayectorias a la llegada con las de la salida por el ID
%matriz que lleva diam inicial, diametrofinal, pesotray, posX, posY
buena=zeros(size(salida,1),5);%vector con 0 si la tray no llega y 1 si llega
j=1;
for i=1:size(salida,1)
    if salida(i,1)==llegada(j,1)
        buena(i,1)=salida(i,2);%diametro inicial
        buena(i,2)=llegada(j,2);%diametro final
        buena(i,3)=pesotray(i)/salida(i,2).^3;%nº de gotas por trayecto
        buena(i,4)=llegada(j,3);%pos X
        buena(i,5)=llegada(j,4);%pos Y
        j=j+1;
    end
    if j>size(llegada,1)
        break
    end
    if j~=1
        while llegada(j,1)==llegada(j-1,1)
            j=j+1;
        end
    end
end
%quitamos las que sean cero
buena=buena(find(sum(buena,2)~=0),:);
%balances
%metodo fluent
mfluent=0;
for i=1:size(buena,1)
    mfluent=mfluent+buena(i,3)*buena(i,1).^3;
end
%metodo lógico
mant=0;
for i=1:size(buena,1)
    mant=mant+buena(i,3)*buena(i,2).^3;
end
mantreal=mant*gastoinyeccion
mfluentreal=mfluent*gastoinyeccion
%empezamos con el VMD
%vector que cuenta las gotas por papelillo
n=zeros(1,size(puntos,2));

```

```

%matriz a trabajar, se queda con los diámetros, pero sólo de donde hay
%gotas, acompa recoge los coeficientes
m=zeros(size(buena,1),size(puntos,2));
acompa=zeros(size(buena,1),size(puntos,2));
%empezamos a rellenar la matriz filtrada
for i=1:size(buena,1)
if buena(i,2)==0;
    continue
end
    for j=1:size(puntos,2)
        if
            ((buena(i,4)>(puntos(1,j)-
mx))&&(buena(i,4)<(puntos(1,j)+mx))&&(buena(i,5)>(puntos(2,j)-
my))&&(buena(i,5)<(puntos(2,j)+my)))
                m(i,j)= 1000*buena(i,2);
                acompa(i,j)=buena(i,3);
                n(1,j)=n(1,j)+1;
            end
        end
    end
end
%%%Ya tenemos la matriz con las gotas filtradas.Empezamos la segunda
%%%parte%%%
%%Aquí habría que volver a relacionar
%limpiar las filas vacías
m=m(find(sum(m,2)>0),:);
acompa=acompa(find(sum(acomp,2)>0),:);
%crear vector VMD y gmap (gotas en el papel, debe ser igual a n)
vmd=zeros(1,size(m,2));
md=zeros(1,size(m,2));
gmap=zeros(1,size(m,2));
%Sacamos el VMD y la masa depositada
for i=1:size(m,2)
    est=[m(:,i),acomp(:,i)];%juntar diámetros con coeficientes
    est=sortrows(est,1);%ordenar por diámetros
    est=est(find(sum(est,2)>0),:);%limpiar filas vacías
    volt=0;%sacamos volumen total en el papelillo
    for j=1:size(est,1)
        volt=volt+(est(j,1).^3)*est(j,2);
    end
    %Si la columna no tiene gotas el VMD es 0
    if volt==0,continue,end
    %reiniciamos los valores a interpolar para el VMD
    a=0;
    b=0;
    %Bajamos por la columna;
    for k=1:size(est,1)
        %valor acumulado anterior
        acum=vmd(i) ;
        %valor acumulado actual
        vmd(i)= vmd(i)+(est(k,1).^3)*est(k,2);
        %diámetro anterior
        b=a;
        %diámetro actual

```

```

a=est(k,1);
%paramos de contar por tener ya los datos que nos interesan
if vmd(i)>0.5*volt || est(k,1)==0, break,end
end
%capta el error que nunca debería de ocurrir
if est(k,1)==0 sprintf('algo va mal'), end
%interpolación
vmd(i)= b+(a-b)*(0.5*volt-acum)/(vmd(i)-acum);
%cuentagotas por papel
gpap(i)=size(est,1);
%deposición del papel (en 1E-7)
md(i)=volt*(1E-2)/(2*mx*2*my)*gastoinyeccion;
end
%mostra nº de gotas al suelo y VMD
n'
vmd'
md'

```

Bibliografía.

ANSYS INC. (2012). *Ansys Fluent 14.0 Theory Guide*.

BERGSTROM, D. J. et al. (1993). *Numerical study of wind flow over a cooling tower*. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 46,47, 657–664.

CHANG, C.H. and MERONEY, R. N. (2001). *Numerical and physical modeling of bluff body flow and dispersion in urban street canyons*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 89 (14-15), 1325–1334.

CONSUEGRO MOLINA, A. J. (2010). *Modelización numérica y validación experimental de la deposición de gotas de agua de una torre de refrigeración de tiro mecánico en un entorno urbano*. Proyecto Fin de Carrera, Universidad Politécnica de Cartagena.

CONSUEGRO MOLINA, A. J. (2012). *Estudio de homogeneidad de la capa límite atmosférica y su aplicación a la modelización numérica del arrastre y deposición de gotas de agua procedentes de una torre de refrigeración de tiro forzado*. Trabajo Fin de Periodo Formativo de Doctorado, Universidad Politécnica de Cartagena.

ENGLAND, W.G. et al. (1973). *Cooling tower plumes-defined and traced by means of computer simulation models*. Cooling Tower Institute Annual Meeting. Houston TX- January 29-31, 41.

FLUENT INC. (2011). *Ansys Fluent User's Guide*.

HERNÁNDEZ, M. (2009). *Informe final de resultados del proyecto: Modelización energética de aero-refrigeradores con preenfriamiento adiabático y simulación energética del arrastre en torres de refrigeración* (ENE 2007-68106-C02-02/CON).

SÁNCHEZ KAISER, A. (2005). *Estudio de la transferencia de calor y de los flujos convectivos inducidos en una cubierta hídrico-solar*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cartagena.

LUCAS, M., MARTÍNEZ, P.J., RUIZ, J., SÁNCHEZ KAISER, A. and VIEDMA, A. (2010). *On the influence of psychrometric ambient conditions on cooling tower drift deposition*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 53, 594–604.

MERONEY, R. N. (2006). *CFD prediction of cooling tower drift*. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 94, 463–490.

MERONEY, R. N. (2008). *Protocol for CFD prediction of cooling tower drift in an urban environment*. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 96, 1789–1804.

OTÓN MARTÍNEZ, R. A. (2010). *Modelo numérico de la capa límite atmosférica en entornos urbanos de grandes dimensiones*. Proyecto Fin de Carrera, Universidad Politécnica de Cartagena.

- POLICASTRO, A.J., et al. (1978). *Comparison of ten drift deposition models to field data acquired in the Chalk Point dry tracer experiment*. Symposium on Environmental Effects of Cooling Tower Plumes, University of Maryland.
- RICHARDS, P. J. and HOXEY, R. (1993). *Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the k-e turbulence model*. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 46,47, 145–153.
- TAKATA, K., NASU, K. and YOSHIKAWA, H. (1996). *Prediction of the plume from a cooling tower*. Cooling Tower Institute Annual Conference, 27.
- VERSTEEG, H.K. and MALALASEKERA, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics. The Finite Volume Method*. (Prentice Hall, Ed.).
- VIEDMA, A. *Mecánica de Fluidos Aplicada*. Universidad Politécnica de Cartagena.
- YANG, Q. and ZHANG, J. (2009). *Simulation of horizontally homogeneous atmosphere boundary layer based on k-e variant models combined with modified wall functions*. The Seventh Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, Taipei, Taiwan.